

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**

Escuela Politécnica Superior



**Optimización estructural de un sistema  
de absorción de energía para material ferroviario**

**Trabajo Fin de Grado**

Grado en Ingeniería Mecánica

Autor: Alejandro Pérez Pizarro

Tutor: Dr. Ramón Zaera Polo

Madrid, Septiembre 2016

*A mis padres y mi hermana*

# *Agradecimientos*

En primer lugar quisiera dar las gracias al Dr. Ramón Zaera Polo por su atención, amabilidad y ayuda durante la realización del proyecto.

También quisiera agradecer a todos los profesores, personal y compañeros de la Universidad Carlos III por estos años.

Gracias a mis padres y a mi hermana por toda la ayuda que me han brindado. Sin su cariño, sus consejos y su interés por mi formación, nada hubiese sido igual. Por todo eso, muchas gracias.

Gracias a mis amigos y amigas, David, Mario, Florin, Manu, Dani, Mariluz y Coral, que han estado soportándome todos estos años. Gracias por escucharme en los malos momentos y por ayudarme a superarlos. Gracias por tanto apoyo desinteresado.

Muchas gracias a todos.

Lo mejor está por llegar.

# ***Resumen***

En este proyecto se lleva a cabo un análisis del comportamiento y la optimización de una estructura diseñada para absorber energía frente al impacto de un tren. Esto se consigue a través de un código computacional basado en el método de los elementos finitos, capaz de reproducir la respuesta dinámica a impacto de elementos estructurales. El software seleccionado es Abaqus/Explicit.

Estas estructuras, que en este caso se denominan toperas y están situadas generalmente al final de las vías, se utilizan como elementos de seguridad pasiva ya que reducen la gravedad de un suceso en caso de accidente. Los elementos de la estructura se deforman de forma controlada para absorber la energía cinética que posee el tren derivada de su movimiento.

Para llevar a cabo el diseño de la estructura se han determinado las propiedades del material, así como, las características del proceso de choque en las que se deben tener en cuenta las no linealidades, las grandes deformaciones y los grandes desplazamientos.

Se han realizado diversos modelos en los cuales se han variado algunas características (espesor, sección, elementos, etc.) para optimizar una estructura inicial sencilla. El objetivo es que las deceleraciones sean lo más pequeñas posibles para que la fuerza que se transmita sobre los ocupantes del vehículo sea baja.

La respuesta de los modelos ha sido evaluada mediante las curvas de aceleración, velocidad, desplazamiento y energía. A través de éstas y observando el modo en el que se produce la deformación se determina cuál es la estructura más óptima.





## **ÍNDICE GENERAL**

<b>Agradecimientos.....</b>	<b>I</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>II</b>
<b>ÍNDICE GENERAL.....</b>	<b>1</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS.....</b>	<b>5</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>11</b>
1.1 MOTIVACIÓN .....	11
1.2 OBJETIVOS.....	16
1.3 CASO DE ESTUDIO .....	17
1.4 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.....	19
<b>2 ESTADO DEL ARTE. ANTECEDENTES .....</b>	<b>22</b>
2.1 FENÓMENO DE IMPACTOS .....	22
2.1.1 Clasificación de los impactos .....	22
2.1.2 Consideraciones importantes de un impacto .....	23
2.2 COMPORTAMIENTO DEL SÓLIDO .....	24
2.2.1 Ecuaciones dinámicas de los sólidos.....	26
2.3 RESISTENCIA AL IMPACTO (CRASHWORTHINESS) .....	27
2.3.1 Importancia de la resistencia al impacto .....	27
2.3.2 Características de la resistencia al impacto .....	28
2.3.3 Medidas de resistencia al impacto .....	29
2.3.4 Test de resistencia al impacto .....	30
2.3.5 Requisitos estructurales.....	30
2.3.6 Mecanismos de deformación .....	31
2.4 DEFORMACIÓN PROGRAMADA .....	33
2.5 ELEMENTOS DE ABSORCIÓN DE ENERGÍA .....	36
2.5.1 Tipos de elementos de absorción de energía .....	36
2.5.2 Aplicaciones.....	40



---

2.5.2.1	Sector automovilístico .....	40
2.5.2.2	Sector aeronáutico .....	43
2.5.2.3	Sector naval .....	46
2.5.2.4	Otras aplicaciones.....	47
2.6	INDUSTRIA FERROVIARIA .....	47
2.6.1	<i>Introducción</i> .....	47
2.6.2	<i>Seguridad pasiva en la industria ferroviaria</i> .....	48
2.6.3	<i>Normativa</i> .....	52
2.6.3.1	Requisitos mínimos de protección .....	52
2.6.3.2	Tipos de accidentes .....	53
2.6.3.3	Proceso validación de resistencia a los impactos .....	54
2.6.4	<i>Toperas ferroviarias</i> .....	55
2.6.4.1	Tipos de toperas ferroviarias .....	56
2.7	MATERIAL EMPLEADO EN ELEMENTOS DE ABSORCIÓN DE ENERGÍA .....	58
2.7.1	<i>Aluminio en la industria ferroviaria</i> .....	59
<b>3</b>	<b>METODOLOGÍA Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....</b>	<b>61</b>
3.1	MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS .....	61
3.1.1	<i>Método explícito</i> .....	65
3.2	ABAQUS.....	65
3.2.1	<i>Análisis dinámico</i> .....	66
3.3	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	66
3.4	DEFINICIÓN DEL ENSAYO .....	67
3.5	CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y CONDICIONES DE CONTORNO.....	69
3.6	ELEMENTOS TIPO <i>SHELL</i> . .....	70
3.7	UNIONES Y CONTACTOS ENTRE PIEZAS.....	70
3.8	MATERIAL EMPLEADO .....	71
3.8.1	<i>Ecuación constitutiva</i> .....	72
3.8.1.1	Modelo de endurecimiento de Johnson-Cook. ....	72
3.8.1.2	Criterio de daño de Johnson-Cook.....	73
3.9	MALLADO.....	76
3.9.1	<i>Análisis de sensibilidad de la malla</i> .....	76



---

<b>4</b>	<b>ANÁLISIS Y RESULTADOS.....</b>	<b>80</b>
4.1	INTRODUCCIÓN .....	80
4.2	MODELO 1 .....	81
4.2.1	<i>Modelo 1.a.....</i>	<i>83</i>
4.2.1.1	Simulación.....	83
4.2.1.2	Conclusiones .....	85
4.2.2	<i>Modelo 1.b.....</i>	<i>85</i>
4.2.2.1	Simulación.....	86
4.2.2.2	Parámetros característicos .....	87
4.2.2.3	Conclusiones .....	91
4.2.3	<i>Modelo 1.c.....</i>	<i>91</i>
4.2.3.1	Simulación.....	91
4.2.3.2	Parámetros característicos .....	93
4.2.3.3	Conclusiones .....	96
4.3	MODELO 2 .....	96
4.3.1	<i>Simulación .....</i>	<i>98</i>
4.3.2	<i>Parámetros característicos.....</i>	<i>101</i>
4.3.3	<i>Conclusiones .....</i>	<i>104</i>
4.4	MODELO 3 .....	105
4.4.1	<i>Simulación .....</i>	<i>106</i>
4.4.2	<i>Parámetros característicos.....</i>	<i>109</i>
4.4.3	<i>Conclusiones .....</i>	<i>112</i>
4.5	MODELO 4 .....	113
4.5.1	<i>Simulación .....</i>	<i>115</i>
4.5.2	<i>Parámetros característicos.....</i>	<i>119</i>
4.5.3	<i>Conclusiones .....</i>	<i>122</i>
4.6	MODELO 5 .....	123
4.6.1	<i>Simulación .....</i>	<i>124</i>
4.6.2	<i>Parámetros característicos.....</i>	<i>127</i>
4.6.3	<i>Conclusiones .....</i>	<i>131</i>
4.7	MODELO 6 .....	132



4.7.1	Modelo 6.a.....	133
4.7.1.1	Simulación.....	133
4.7.1.2	Parámetros característicos .....	135
4.7.1.3	Conclusiones .....	137
4.7.2	Modelo 6.b.....	138
4.7.2.1	Simulación.....	139
4.7.2.2	Parámetros característicos .....	142
4.7.2.3	Conclusiones .....	148
4.8	TABLA RESUMEN PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS DIFERENTES MODELOS .....	149
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....</b>	<b>151</b>
5.1	CONCLUSIONES .....	151
5.2	TRABAJOS FUTUROS .....	154
<b>6</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>156</b>

## **ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS**

Figura 1. Tope mecánico fijo con unidad hidráulica Oleo [2].....	11
Figura 2 Zonas de deformación y espacio de seguridad en un ferrocarril [3] .....	12
Figura 3. Zonas de deformación y espacio de seguridad en un ferrocarril [4] .....	13
Figura 4. Comparación riesgo de muerte por accidente en diferentes medios de transporte (Europa 2008-2012) [5] .....	14
Figura 5. Número de víctimas y lesiones producidas por accidente ferroviario (Europa 2007-2012) [5] .....	14
Figura 6. Tipo de víctimas en accidente ferroviario (Europa 2008-2012) [5] .....	15
Figura 7. Número de accidentes según su tipología (Europa 2008-2012) [5] .....	15
Figura 8. Accidente ferroviario en la estación de Once (Argentina) .....	16
Figura 9. Modelo simplificado del problema a analizar .....	18
Figura 10. Movimiento de dislocaciones en materiales .....	24
Figura 11. Endurecimiento por deformación .....	25
Figura 12. Modo de colapso axial [11] .....	32
Figura 13. Plegado que produce flexión [11] .....	32
Figura 14. Curva fuerza-desplazamiento de una zona de deformación programada [16] .....	34
Figura 15. Zonas de diferentes resistencias para plegado [18] .....	35
Figura 16. Diferentes configuraciones de puntos fusibles [15] .....	35
Figura 17. Comparación de curvas de fuerza-desplazamiento de un tubo vacío, una espuma y un tubo con una espuma en su interior. ....	37
Figura 18. Ejemplo de espuma metálica de aluminio [12] .....	38
Figura 19. Curva tensión-deformación a compresión típica de una espuma metálica [ASHBY ET AL., 2000] .....	38
Figura 20. Elemento tubular con configuración multicelda [29] .....	39
Figura 21. Elemento no tubular de disipación de energía [30] .....	40
Figura 22. Secciones de un vehículo en función de su capacidad de deformación .....	41
Figura 23. Líneas de transmisión de fuerzas en un vehículo ante un impacto .....	41

Figura 24. Ensayo impacto frontal [31] .....	42
Figura 25. Ensayo impacto lateral [31] .....	43
Figura 26. Parte del fuselaje del avión donde van los pasajeros. ....	44
Figura 27. Estructura sin deformar (a) y estructura deformada (b) [33] .....	44
Figura 28. Elementos de absorción de energía en el compartimento de almacenamiento de maletas situado encima de los pasajeros [34] .....	45
Figura 29. Componentes de absorción de energía de un helicóptero [12] .....	46
Figura 30. Estructura interna de un buque .....	47
Figura 31. Tipos de impactos en ferrocarriles [4] .....	49
Figura 32. Elementos de absorción de energía de un ferrocarril [39] .....	50
Figura 33. Etapas de deformación de un ferrocarril .....	50
Figura 34. Comparación del desplazamiento relativo de los ocupantes de un tren en un diseño convencional y en un diseño óptimo de elementos de absorción de energía [37] .....	51
Figura 35. Pruebas sobre los pasajeros de un vehículo ferroviario .....	51
Figura 36. Tipo de impacto según la norma EN-15227 .....	54
Figura 37. Proceso de validación en la estructura de un ferrocarril .....	55
Figura 38. Tipos de accidentes que se producen por el uso de toperas no óptimas. ....	55
Figura 39. Toperas deslizantes de fricción .....	56
Figura 40. Toperas deslizantes de fricción no hidráulicas .....	57
Figura 41. Toperas fijadas sobre el suelo .....	57
Figura 42. Toperas fijas sobre bloque de hormigón .....	58
Figura 43. Proceso de discretización de un sistema continuo .....	62
Figura 44. Vista isométrica de un modelo de ensayo .....	67
Figura 45. Definición de las partes del modelo .....	68
Figura 46. Desplazamiento en función del tiempo para análisis de sensibilidad de malla .....	77
Figura 47 Vista en isométrico del modelo 1 .....	81
Figura 48. Proceso de deformación del modelo 1.a en función del tiempo .....	84
Figura 49. Proceso de deformación del modelo 1.b en función del tiempo .....	87



Figura 50. Evolución de la aceleración del tren durante el impacto (modelo 1.b).....	87
Figura 51. Velocidad en función del tiempo (modelo 1.b).....	88
Figura 52. Desplazamiento del tren durante el impacto (modelo 1.b). ....	89
Figura 53. Energía del sistema en función del tiempo (modelo 1.b).....	90
Figura 54. Proceso de deformación del modelo 1.c en función del tiempo .....	93
Figura 55. Aceleración global y aceleración en el instante inicial para el modelo 1.c...	93
Figura 56. Velocidad en función del tiempo (modelo 1.c).....	94
Figura 57. Desplazamiento del tren durante el impacto (modelo 1.c).....	95
Figura 58. Energía del sistema en función del tiempo (modelo 1.c).....	95
Figura 59. Vista isométrica diferentes configuraciones (a y b) para el modelo 2 .....	96
Figura 60. Proceso de deformación del modelo 2.a en función del tiempo .....	99
Figura 61. Proceso de deformación del modelo 2.b en función del tiempo .....	100
Figura 62. Evolución de la aceleración del tren durante el impacto (modelo 2.a y 2.b) .....	101
Figura 63. Velocidad en función del tiempo (modelo 2.a y 2.b).....	102
Figura 64. Desplazamiento del tren durante el impacto (modelo 2.a y 2.b).....	102
Figura 65. Energía en función del tiempo (modelo 2.a y 2.b).....	103
Figura 66. Proceso de deformación del modelo 3.a en función del tiempo .....	107
Figura 67. Proceso de deformación del modelo 3.b en función del tiempo .....	109
Figura 68. Evolución de la aceleración del tren durante el impacto (modelo 3.a) .....	109
Figura 69. Evolución de la aceleración del tren durante el impacto (modelo 3.b).....	110
Figura 70. Velocidad en función del tiempo (modelo 3.a y 3.b).....	111
Figura 71. Desplazamiento del tren durante el impacto (modelo 3.a y 3.b).....	111
Figura 72. Energía del sistema en función del tiempo (modelo 3.a y 3.b). ....	112
Figura 73. Secciones de estudio de celda única (modelo 4).....	113
Figura 74. Dimensiones nueva placa modelo 4 .....	114
Figura 75. Proceso de deformación del modelo 4.a en función del tiempo .....	116
Figura 76. Proceso de deformación del modelo 4.b en función del tiempo .....	118
Figura 77. Evolución de la aceleración del tren durante el impacto (modelo 4.a) .....	119
Figura 78. Evolución de la aceleración del tren durante el impacto (modelo 4.b).....	120



Figura 79. Velocidad en función del tiempo (modelo 4.a y 4.b).....	121
Figura 80. Desplazamiento del tren durante el impacto (modelo 4.a y 4.b).....	121
Figura 81. Energía del sistema en función del tiempo (modelo 4.a y 4.b).....	122
Figura 82. Secciones multicelda analizadas .....	123
Figura 83. Proceso de deformación del modelo 5.a en función del tiempo .....	125
Figura 84. Proceso de deformación del modelo 5.b en función del tiempo .....	127
Figura 85. Evolución de la aceleración del tren durante el impacto (modelo 5.a) .....	128
Figura 86. Evolución de la aceleración del tren durante el impacto (modelo 5.b).....	128
Figura 87. Velocidad en función del tiempo (modelo 5.a y 5.b).....	129
Figura 88. Desplazamiento del tren durante el impacto (modelo 5.a y 5.b).....	130
Figura 89. Energía del sistema en función del tiempo (modelo 5.a y 5.b).....	131
Figura 90. Sección elementos de absorción de energía (modelo 6.a).....	132
Figura 91. Proceso de deformación del modelo 6.a en función del tiempo .....	134
Figura 92. Evolución de la aceleración del tren durante el impacto (modelo 6.a) .....	135
Figura 93. Velocidad en función del tiempo (modelo 6.a).....	136
Figura 94. Desplazamiento del tren durante el impacto (modelo 6.a).....	136
Figura 95. Energía del sistema en función del tiempo (modelo 6.a).....	137
Figura 96. Zonas específicas topera modelo 6.b .....	138
Figura 97. Proceso de deformación del modelo 6.b en función del tiempo .....	141
Figura 98. Evolución de la aceleración del tren durante el impacto (modelo 6.b).....	142
Figura 99. Velocidad en función del tiempo (modelo 6.b).....	143
Figura 100. Desplazamiento del tren durante el impacto (modelo 6.b) .....	144
Figura 101. Energía del sistema en función del tiempo (modelo 6.b).....	144
Figura 102. Reacción eje X de los empotramientos (modelo 6.b) .....	145
Figura 103. Reacción eje Y de los empotramientos (modelo 6.b) .....	146
Figura 104. Reacción eje Z de los empotramientos (modelo 6.b).....	146
Figura 105. Reacción momento flector eje X de los empotramientos (modelo 6.b)...	147
Figura 106. Reacción momento flector eje Z de los empotramientos (modelo 6.b) ...	147
Figura 107. Reacción momento flector eje Y de los empotramientos (modelo 6.b)...	148





---

Tabla 1. Propiedades del aluminio 1100-H12 .....	75
Tabla 2 Distintos tamaños de malla para un modelo analizado .....	77
Tabla 3. Definición dimensiones de los elementos del modelo 1 .....	83
Tabla 4. Definición de espesores modelo 1.a .....	83
Tabla 5 Definición de espesores modelo 1.b .....	85
Tabla 6 Definición de espesores modelo 1.c .....	91
Tabla 7. Definición dimensiones de los elementos del modelo 2 .....	98
Tabla 8. Definición geometría modelo 3.b .....	106
Tabla 9. Definición de espesores modelo 4.a y 4.b .....	114
Tabla 10. Definición espesores modelo 5 .....	123
Tabla 11. Definición espesores modelo 6.a .....	133
Tabla 12. Definición longitudes parte 2 y 3 del modelo 6.b .....	139
Tabla 13 Principales características de los diferentes modelos analizados .....	149



# *Capítulo 1*

## *INTRODUCCIÓN*

# 1 Introducción

## 1.1 Motivación

El comportamiento que presentan las estructuras frente a solicitaciones dinámicas tiene un interés especial, ya que permite dar respuesta a multitud de problemas de aplicación en diferentes campos. Aunque la probabilidad de que se produzca una colisión es menor que la de otro tipo de sucesos, sus consecuencias pueden ser desastrosas.

El análisis de este tipo de problemas exige procedimientos de cálculo distintos a los de otras solicitaciones dinámicas más comunes en la dinámica estructural. Normalmente la estructura presenta un evidente comportamiento no lineal, con grandes desplazamientos y deformaciones además de efectos de interacción complejos en los contactos, fenómenos de transmisión de ondas de tensión y ondas de choque [1].

Muchas estaciones de pasajeros y de mercancías están situadas en finales de vía. En caso de que un tren no pueda detenerse o reducir su velocidad lo suficiente para evitar que impacte o pase por encima de la plataforma, una instalación de topes eficaces protege a los pasajeros, las mercancías, al material rodante y a las infraestructuras [2].



Figura 1. Tope mecánico fijo con unidad hidráulica Oleo [2]

Los topes mecánicos pueden construirse de manera que se adapten al diseño y los criterios específicos de cada proyecto. Estas estructuras forman parte de los sistemas de seguridad pasiva, es decir, de aquellos sistemas destinados a reducir los posibles daños físicos en caso de accidente.

Por otra parte, los elementos de absorción de energía también están presentes en las estructuras de los vehículos de los distintos medios de transporte, ya que la seguridad de un vehículo frente a un impacto depende en gran medida de la capacidad disipación de energía de los elementos estructurales que lo componen.

Para comprender como se comportan las estructuras de absorción de energía que tienen los vehículos frente a una colisión, éstas se pueden dividir en dos partes: una parte rígida y sin deformaciones que comprometan la seguridad de los pasajeros, y una parte que generalmente se suele situar en torno a la parte rígida, capaz de deformarse y, por tanto, disipar la mayor cantidad de energía posible.

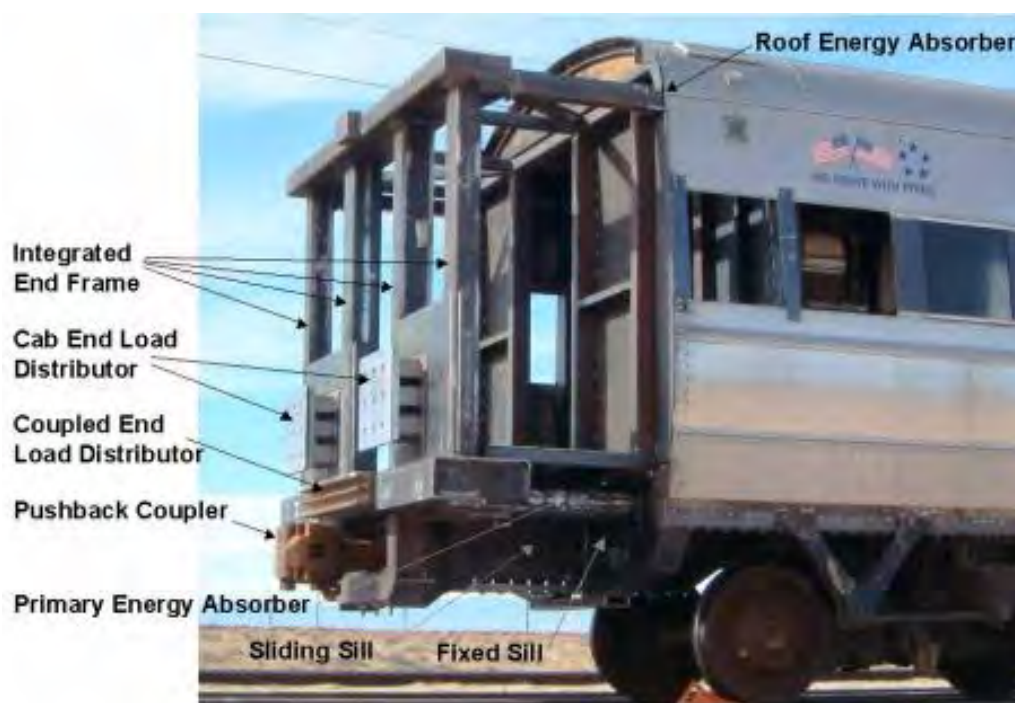
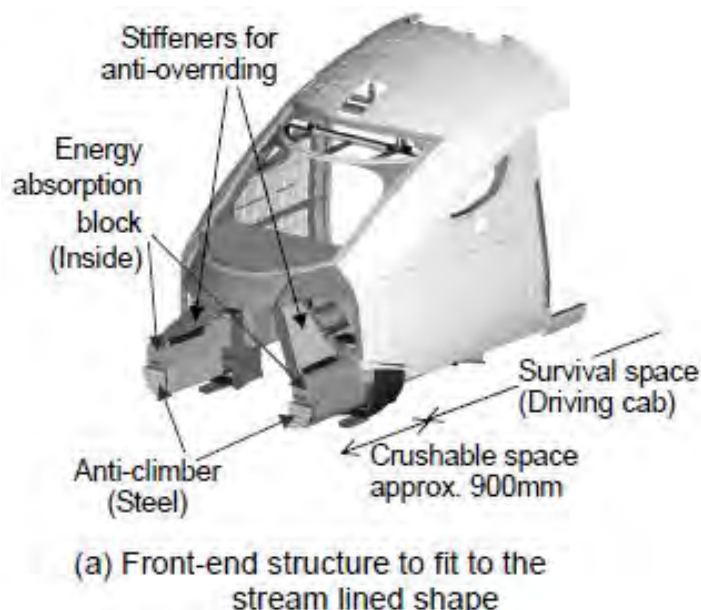


Figura 2 Zonas de deformación y espacio de seguridad en un ferrocarril [3]



**Figura 3. Zonas de deformación y espacio de seguridad en un ferrocarril [4]**

La estructura que se va a analizar en el proyecto es aquella que es capaz de deformarse. La función de estas estructuras es la de transformar la energía cinética del elemento que impacta en energía de deformación plástica mediante un proceso de plegado secuencial. Esta deformación se traduce en una deceleración y, en consecuencia, en una fuerza que se transmite sobre el elemento que impacta. Por lo tanto, cuanto más óptimo es el elemento que se deforma, menor es la deceleración que se produce y menor es la fuerza que se transmite sobre los pasajeros, de modo que se aumenta la seguridad de los mismos.

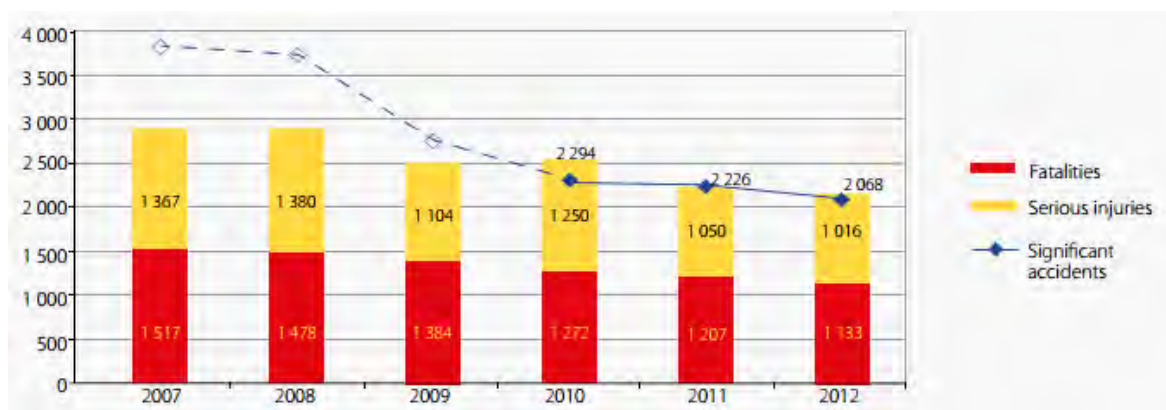
La búsqueda de elementos de absorción de energía más eficientes se ha convertido de este modo en un aspecto muy importante de la industria actual. Debido al aumento de la movilidad de las personas y a las grandes cantidades de mercancías que se transportan, resulta necesario para las empresas invertir en un aspecto tan importante como es el de la seguridad pasiva. Los fabricantes deben incorporar nuevas tecnologías con el fin de garantizar la seguridad de los ocupantes del vehículo, así como, aquellos que puedan verse involucrados en un posible accidente.

La seguridad de los ferrocarriles europeos es relativamente alta, siendo uno de los medios de transporte más seguros (Figura 4). Sin embargo, es esencial mantener y mejorar el nivel actual de seguridad, lo que se traduce en un aumento de la importancia del diseño y la evaluación de impactos [5].

Transport mode used by user	Fatalities per billion passenger kilometres
Airline passenger <sup>(1)</sup>	0.06
Railway passenger	0.13
Bus/Coach occupant <sup>(2)</sup>	0.20
Car occupant	3.14
Powered two-wheelers	48.94

**Figura 4. Comparación riesgo de muerte por accidente en diferentes medios de transporte (Europa 2008-2012) [5]**

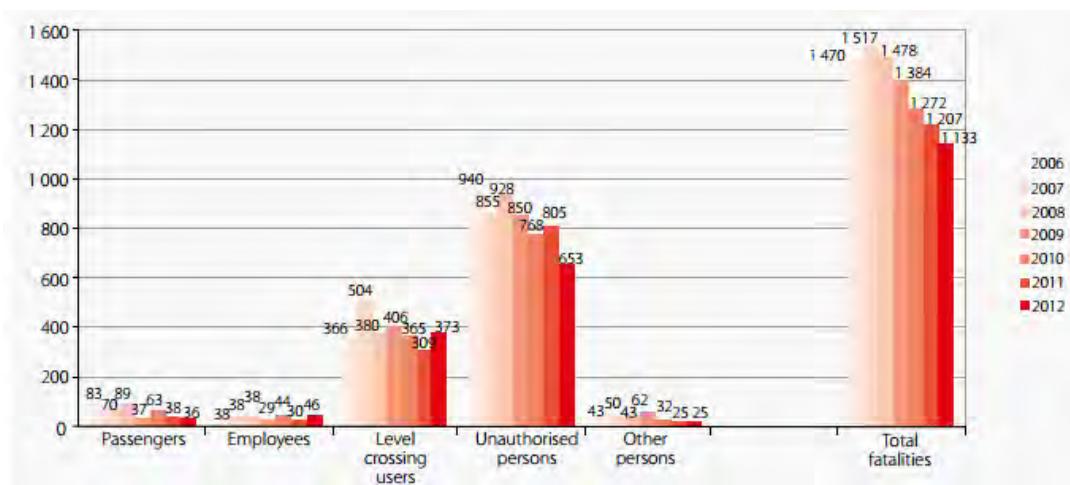
Los últimos datos aportados por la Agencia Ferroviaria de la Unión Europea muestran la tendencia decreciente en el número de lesiones y muertes producidas por accidentes de ferrocarril durante los años 2007-2012.



**Figura 5. Número de víctimas y lesiones producidas por accidente ferroviario (Europa 2007-2012) [5]**

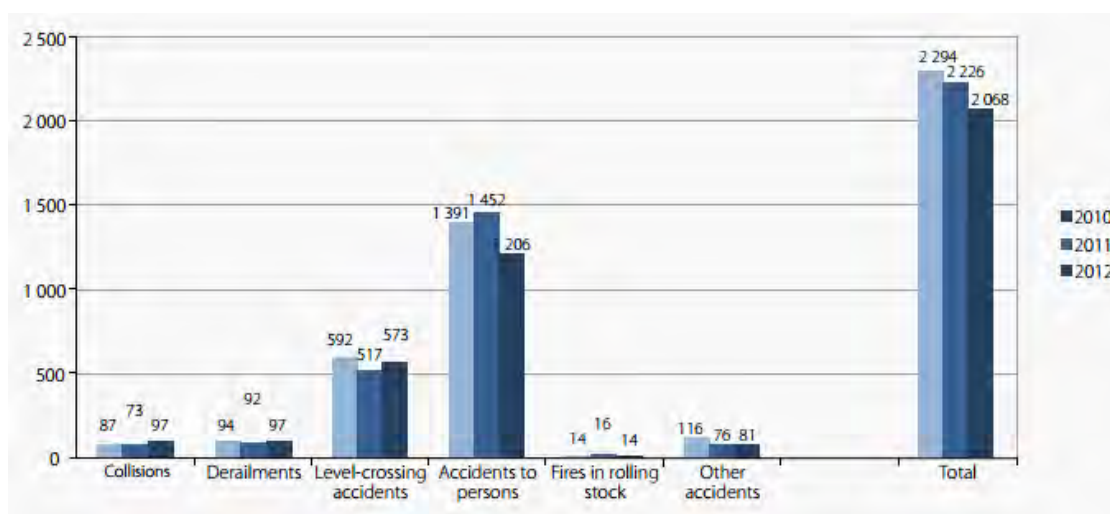
Aunque es necesario aclarar que la mayor parte de las víctimas que se producen en caso de accidente no son los pasajeros ni la tripulación (Figura 6).





**Figura 6. Tipo de víctimas en accidente ferroviario (Europa 2008-2012) [5]**

Además, la mayor parte de los accidentes que ocurren en el sector ferroviario no son del tipo que se va a estudiar en este proyecto (choque entre el tren y una topera). Sin embargo, este tipo de accidentes ha causado víctimas mortales a lo largo de la historia [6] y, por lo tanto, siguen teniendo gran importancia.



**Figura 7. Número de accidentes según su tipología (Europa 2008-2012) [5]**

Un ejemplo es el accidente que ocurrió en la estación de Once en Argentina. Este accidente se produjo cuando un tren que llegaba a la estación no detuvo su marcha

e impactó contra la topera. El suceso acabó produciendo un total de 52 víctimas y 701 heridos [7].



**Figura 8. Accidente ferroviario en la estación de Once (Argentina)**

Teniendo en cuenta los datos mostrados, resulta necesaria una constante investigación y mejora de los sistemas de seguridad pasiva. La mejora de este tipo de estructuras tiene como consecuencias una disminución del número de víctimas y lesiones en caso de accidente, lo cual denota su importancia en una situación de crecimiento en el uso de este medio de transporte.

## **1.2 Objetivos**

El objetivo del proyecto es el diseño y la optimización de un elemento estructural que proteja frente al impacto de un tren. Para ello, se lleva a cabo el desarrollo analítico de varios modelos mediante el uso del programa de elementos finitos Abaqus/Explicit, el cual permite evaluar la respuesta frente a impacto de una estructura.



En la consecución de este objetivo final se deben tener en cuenta los objetivos específicos que se exponen a continuación:

- Búsqueda de información acerca de los elementos de absorción de energía, especialmente sobre toperas ferroviarias (artículos científicos, *papers*, libros, artículos de revistas, etc.).
- Adquisición de la destreza necesaria sobre el programa de elementos finitos Abaqus/Explicit.
- Desarrollo de diferentes modelos estructurales simplificados, en los que se varían diversos parámetros geométricos de acuerdo a unas condiciones de partida impuestas por el problema.
- Análisis y comparación de resultados (gráficas, datos, modos de deformación, etc.) que permitan cuantificar cómo varían los resultados en función de los cambios que se hayan producido en el diseño.
- Selección del diseño final y motivo por el cual ofrece un mejor rendimiento respecto a los diseños no optimizados.

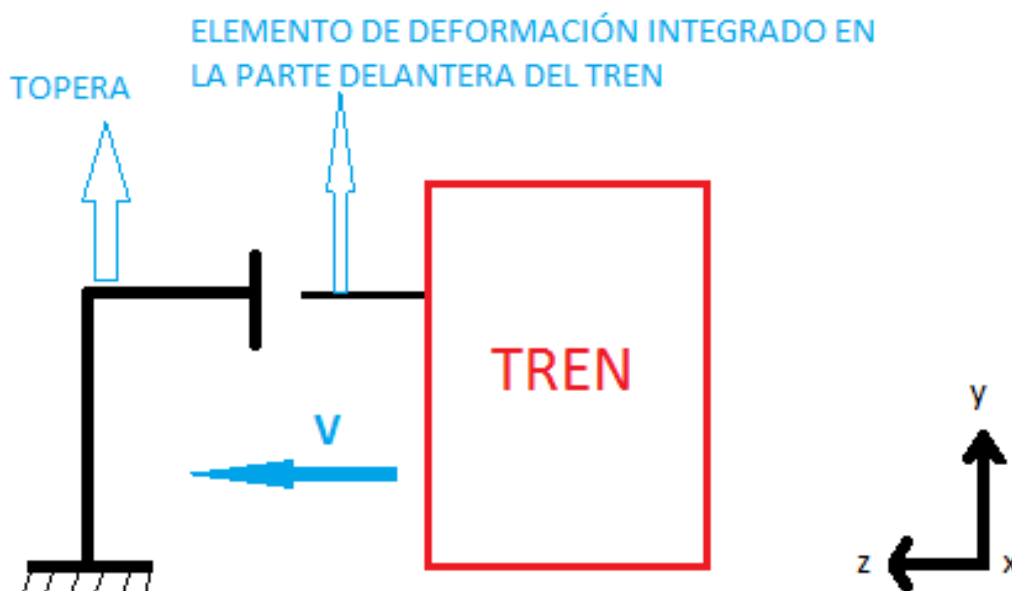
Es importante puntualizar que el tipo de condiciones que se imponen en el problema hace que el número de soluciones posibles sea muy elevado. Las combinaciones posibles de cambios en el espesor, sección en la zona que se deforma plásticamente y forma geométrica del empotramiento son muy grandes y, por lo tanto, el principal objetivo es mostrar el proceso de mejora respecto a un modelo inicial sencillo y explicar el motivo de dicha mejora.

### **1.3 Caso de estudio**

Para entender la consecución de los objetivos es necesario explicar en qué consiste el modelo que se va a analizar en este proyecto.

Se trata de un modelo de topera ferroviaria empotrada en el terreno sobre la cual va a impactar un tren que porta en la parte delantera un elemento que también se va a

deformar. Para comprenderlo de forma más clara se presenta el siguiente esquema del modelo simplificado.



**Figura 9. Modelo simplificado del problema a analizar**

Como se puede comprobar en la Figura 9 la única restricción de movimiento que existe en la topera es un empotramiento que se sitúa entre ésta y el terreno. Por otro lado, el elemento que va en el tren se une a este mediante una unión de tipo agarre. Es importante tener en cuenta todas las restricciones de movimiento para diseñar y analizar los resultados que se obtienen.

Además se deben tener en cuenta unas condiciones de partida que se imponen sobre el problema a estudiar y que son:

- Material: Aluminio 1100-H12. Este material sigue la ecuación de endurecimiento de Johnson Cook, siendo además su modelo de daño. Este material es invariable y debe ser empleado en todos los elementos que lo requieran.
- Velocidad: la velocidad a la que debe impactar el tren es de 15 m/s.
- Geometría: los elementos que se deformen tras el impacto no deben superar un área frontal mayor que 2.5 m de ancho y 2 metros de alto.

- Masa: la única masa que se impone es la del tren que va a impactar. Su masa es constante e igual a 1000 kg.
- Altura media de contacto: el impacto entre tren y topera, más concretamente entre el elemento del tren que se deforma y la topera debe producirse a una altura media de 1 metro sobre el suelo.

## **1.4 Estructura de la memoria**

Para facilitar su lectura y comprensión, el presente trabajo fin de grado se ha dividido en una serie de capítulos en los que se describen las diferentes fases del trabajo. Estos capítulos son los siguientes:

### ➤ **Capítulo 1 .Introducción.**

Contiene el motivo por el cual debe realizarse una investigación de los elementos de absorción de energía, los objetivos que se pretenden alcanzar al finalizar el estudio, el caso de estudio específico que se va a tratar y la estructura de contenidos que presenta el proyecto.

### ➤ **Capítulo 2. Estado del arte. Antecedentes.**

Se abordan aquellos aspectos que son necesarios tratar para conocer los elementos de absorción de energía en profundidad, sus aplicaciones, su importancia y las características básicas de los impactos. Además como en este caso el análisis y estudio de la estructura es para material ferroviario se detalla en qué consiste una topera ferroviaria, qué tipos hay y para qué se utilizan.

### ➤ **Capítulo 3. Metodología y Definición del problema.**

Se describe el método de los elementos finitos y su aplicación en la industria. Se especifica el software empleado para llevar a cabo el desarrollo de las simulaciones y se explican sus principales características. Además, se exponen las características del



problema que se va a abordar. Se explica en qué consiste la geometría del modelo, las condiciones de contorno que se deben imponer, los contactos entre los diferentes elementos, los tipos de elementos empleados y las características del material (ecuación constitutiva que rige este material, exponiendo su modelo de daño y endurecimiento).

➤ **Capítulo 4. Análisis y Resultados.**

Se describen los diferentes diseños sobre toperas que se han establecido, las principales características del impacto, las mejoras en los modelos y su motivo. Para ello, se establece un análisis profundo de los resultados obtenidos a través del programa (gráficas, datos, visualización de tensiones, modos de deformación y fractura, etc.).

➤ **Capítulo 5. Conclusiones y trabajos futuros.**

Se establecen, de forma sintetizada, las conclusiones sobre los resultados finales extraídas del análisis de los diferentes modelos. Además, se exponen los posibles trabajos futuros que se pueden llevar a cabo sobre dicha temática.

➤ **Capítulo 6. Referencias bibliográficas.**

En este capítulo se citan las fuentes que se han utilizado para la consecución del presente proyecto.



## *Capítulo 2*

# *ESTADO DEL ARTE. ANTECEDENTES*

## **2 ESTADO DEL ARTE. ANTECEDENTES**

### **2.1 Fenómeno de impactos**

Los impactos son sollicitaciones dinámicas que se caracterizan por ser eventos de gran intensidad y de corta duración que pueden producir daños importantes sobre las estructuras (roturas, deformaciones, alteración en la estabilidad, movimientos, etc.).

Según los procedimientos clásicos de la mecánica de sistemas rígidos, las colisiones se estudian a través de la teoría de impulsiones. En esta teoría, que considera que la duración de un impacto es instantánea, se aplica la conservación de cantidad de movimiento y momento cinético [1]. El balance de energía se mide a través del coeficiente de restitución (medida del grado de conservación de la energía cinética en un choque entre partículas).

La teoría de impulsiones permite calcular un estado del movimiento después de la impulsión, el cual debe ser considerado como una nueva condición inicial para la dinámica del sistema a partir de dicho instante. Sin embargo, en la mayoría de las situaciones reales es necesario un estudio más profundo sobre temas que la teoría de impulsiones no trata, tales como: modo en que se produce la pérdida de energía, desarrollo de la fuerza de impacto a través del contacto entre cuerpos, rotura de los elementos debido a las elevadas tensiones, etc. [1]

Por esta razón, es necesario emplear métodos numéricos que posibiliten la adecuada resolución de las ecuaciones.

#### **2.1.1 Clasificación de los impactos**

Resulta complicado establecer una clasificación que abarque todos los escenarios posibles en los que se puede originar un impacto y cuyo estudio puede diferir en gran medida.

A pesar de esto, y con el fin de realizar una primera aproximación, los impactos se pueden clasificar según diversos aspectos. Algunos de los más importantes son:

En función del coeficiente de restitución (velocidades relativas de los dos objetos tras el impacto):

- Choques elásticos.
- Choques parcialmente inelásticos.
- Choques totalmente inelásticos.

En función de la velocidad a la que se produce el impacto, estos se pueden clasificar en [1]:

- Bajas velocidades ( $v < 50\text{m/s}$ ).
- Velocidad media ( $50\text{m/s} < v < 500\text{m/s}$ ).
- Velocidad alta ( $500\text{m/s} < v < 2000\text{m/s}$ ).
- Hipervelocidad ( $v > 2000\text{m/s}$ ).

### **2.1.2 Consideraciones importantes de un impacto**

Los fenómenos producidos por el impacto que se deben tener en cuenta cuando se estudia un suceso de este tipo son los siguientes [1]:

- *Dinámica y vibraciones estructurales.* Son importantes sus consecuencias a baja velocidad. Se pueden estudiar mediante métodos de integración implícita o explícita en el tiempo.
- *Propagación de ondas de tensión y choque.* En los impactos a velocidades medias y bajas es importante analizar el efecto de las ondas de tensión, que se convierten en ondas de choque para impactos a hipervelocidad.
- *Comportamiento no lineal del material.* Se tienen en cuenta aspectos como la plasticidad, rotura, dependencia de la velocidad de deformación, dependencia de la energía interna o temperatura. Se produce en mayor medida al aumentar la velocidad de impacto, aunque para velocidades muy elevadas el material pasa a comportarse prácticamente como un fluido y su resistencia puede despreciarse.

- *Grandes desplazamientos.* Cambios de geometría y rotaciones finitas que a su vez influyen en las cargas y su efecto.
- *Grandes deformaciones.* Los alargamientos unitarios de los materiales en fases sólidas pueden superar el 100%. Bajo presiones muy elevadas el material se comporta como un fluido, con deformaciones muy grandes.
- *Contactos y fenómenos de interfaz en los contornos.* El contacto es muy importante en cualquier modelo de impacto, puesto que a través de estos se produce la transmisión de las cargas.
- *Fenómenos locales de rotura.* Se trata de los mecanismos de rotura del blanco (objeto que sufre el impacto) que producen la penetración parcial o total.

## 2.2 Comportamiento del sólido

Cuando a un metal se le aplica una tensión que está por encima del límite elástico se produce la aparición de deformaciones permanentes o deformaciones plásticas.

La deformación plástica se puede observar macroscópicamente de forma homogénea a través del cambio permanente de forma del material, mientras que a nivel microscópico se observa como un movimiento de un gran número de dislocaciones cuyo proceso se denomina deslizamiento. [8]

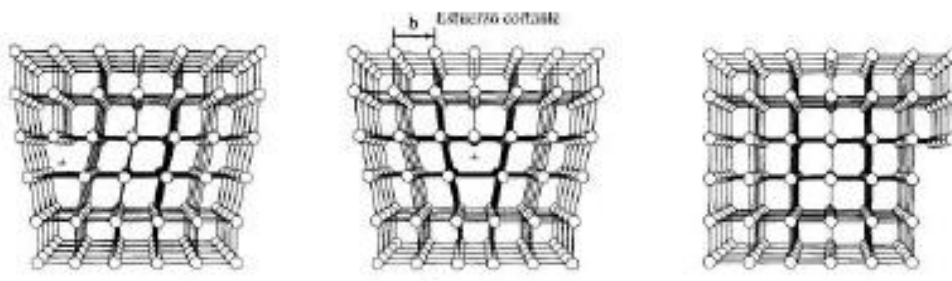
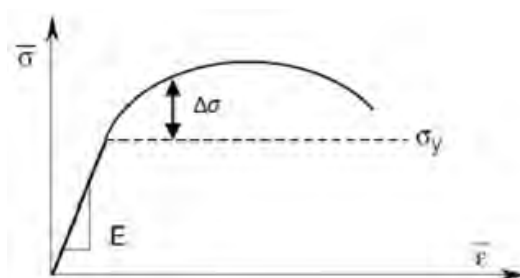


Figura 10. Movimiento de dislocaciones en materiales



La deformación plástica se asocia esencialmente a esfuerzos cortantes (en general, a tensiones desviadoras). Las tensiones hidrostáticas no influyen significativamente en la deformación plástica, es decir, bajo deformación plástica, no hay cambios permanentes en el volumen del sólido, sólo cambios en su forma [9].

Un concepto importante a tener en cuenta es el denominado endurecimiento por deformación plástica, fenómeno mediante el cual el material se hace más resistente a medida que se deforma plásticamente. Este fenómeno se produce cuando al aplicar una carga sobre el material las dislocaciones presentes en su estructura se desplazan. El crecimiento en la densidad de las dislocaciones y, en consecuencia, las interacciones entre estas, producen una limitación en su movimiento. De este modo, la tensión necesaria para deformar el material aumenta con la deformación plástica (Figura 11).



**Figura 11. Endurecimiento por deformación**

Para la aplicación que atañe a este proyecto es necesario fijarse en la situación macroscópica. Su análisis requiere de la definición de un criterio de plastificación en el cual se establezcan las condiciones para que comience el proceso de deformación plástica, así como una relación constitutiva entre tensión y deformación.

El criterio de plastificación que se emplea en este caso es el de Von Mises, el cual establece que en una situación tridimensional general, la plastificación se produce cuando la Tensión Equivalente de Von Mises alcanza un valor igual al límite de elasticidad del material medido en un ensayo de tracción uniaxial [10].

Es decir, el material plastifica cuando

$$\sigma_y = q$$

Donde  $q$  es la tensión equivalente de Von Mises y  $\sigma_y$  es el límite elástico instantáneo, que depende del endurecimiento experimentado por el material. La tensión equivalente de Von Mises se puede escribir en función de las tensiones principales del siguiente modo:

$$q = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

### 2.2.1 Ecuaciones dinámicas de los sólidos

El comportamiento dinámico de materiales sólidos se rige por una serie de ecuaciones diferenciales básicas que expresa el balance de ciertas magnitudes. El balance de movimiento, o ecuación de Cauchy se expresa en la configuración deformada como [1]:

$$\nabla \cdot \sigma + b = \rho \dot{v}$$

Donde  $\nabla \cdot (\cdot)$  es el operador de divergencia,  $\sigma$  es el tensor de tensiones de Cauchy,  $b$  las fuerzas volumétricas,  $\rho$  la densidad volumétrica y  $\dot{v}$  la velocidad. Por su parte, el momento cinético obliga a la simetría del tensor de tensiones,  $\sigma = \sigma^T$ . La conservación de la masa o ecuación de la continuidad establece [1].

$$\frac{1}{\rho} \dot{\rho} + \nabla \cdot v = 0$$

Por último, la ecuación de balance de energía se escribe como:

$$\rho \dot{u} = \sigma : d + \nabla \cdot h + r = 0$$

Donde  $u$  es la energía interna por unidad de masa,  $d = \frac{1}{2} [\nabla \cdot v + (\nabla \cdot v)^T]$  el tensor velocidad de deformación,  $r$  la densidad de fuentes de calor y  $h$  el vector flujo calorífico.

Las ecuaciones anteriores son válidas para cualquier material. A ellas hay que agregar las leyes adicionales, denominadas ecuaciones constitutivas, que expresan el comportamiento del material y varían dependiendo del mismo y del régimen a que esté

sometido. Principalmente se trata de ecuaciones constitutivas mecánicas que expresan la tensión en función de la deformación y de otros parámetros [1].

## **2.3 Resistencia al impacto (Crashworthiness)**

El término *Crashworthiness* fue utilizado por primera vez en la industria aeroespacial en la década de los 50, aunque actualmente se utiliza también en la industria ferroviaria, militar, automovilística, etc. [11].

La resistencia al impacto o *Crashworthiness* ofrece una medida de la capacidad de una estructura y sus componentes para proteger a sus ocupantes en caso de impacto. Dicho de otro modo la resistencia al impacto estructural es la calidad de la respuesta de un vehículo cuando este se ve sometido a un impacto. El rendimiento de la estructura a prueba de choques es mayor cuanto menores sean los daños del vehículo y sus ocupantes después del impacto [11-13].

El objetivo principal es el diseño de un vehículo con una estructura capaz de absorber la energía del impacto mediante deformaciones controladas, de modo que se asegure mantener la integridad de un espacio óptimo donde se sitúan los ocupantes. La energía residual del impacto puede ser controlada por los sistemas de retención, de forma que se reduzcan las cargas que se transfieren a los ocupantes del vehículo.

La evaluación sobre la resistencia al impacto se determina mediante una combinación de métodos analíticos y pruebas que incluyen el modo de deformación de la estructura, la aceleración experimentada y la probabilidad de lesión predicha por los modelos del cuerpo humano [11-13]. Estos criterios se establecen en función de la naturaleza del impacto y del tipo de vehículo implicado.

### **2.3.1 Importancia de la resistencia al impacto**

Cuando comenzaron a diseñarse las estructuras de los primeros vehículos, éstas se fabricaban a partir de madera y el objetivo de la resistencia al impacto era evitar lo máximo posible las deformaciones de vehículos. Este diseño estructural se basaba

principalmente en la experiencia y en informes, por lo que no se podía evaluar la resistencia al impacto total de un vehículo hasta que no se construía un prototipo y se probaba [11].

Sin embargo, con el paso de los años, la resistencia frente impactos y la seguridad de los ocupantes de los medios de transporte se convirtió en una de las consideraciones más importantes y complejas a tener en cuenta en el diseño de un vehículo. Las estructuras evolucionaron para incluir zonas de deformación progresiva para absorber parte de la energía cinética de choque a través de deformaciones plásticas [11].

### **2.3.2 Características de la resistencia al impacto**

Las colisiones de vehículos son eventos dinámicos únicos que ocurren de forma aleatoria. El vehículo puede colisionar contra otro vehículo similar o diferente, contra un objeto fijo, puede existir un impacto único o múltiples impactos y la velocidad a la que ocurre es diferente en cada caso.

Estos factores muestran algunas de las complejidades que se deben tener en cuenta en el diseño de estructuras de vehículos para satisfacer los requisitos mínimos de resistencia al impacto para todos los escenarios de impactos posibles.

Los problemas de resistencia al impacto pueden describirse mediante [13]:

- *El desplazamiento y la energía*: la estructura debe absorber la máxima energía posible y minimizar la intrusión dentro del habitáculo de seguridad.
- *Pulso durante el impacto*: este término mide la deceleración inducida en el cuerpo humano derivado de la fuerza del impacto. Para la evaluación se aplica el criterio de lesión en la cabeza (HIC). El pico de desaceleración durante el impacto debe situarse por debajo del límite de tolerancia humana.
- *Posición de choque*: la estructura debe ser capaz de disipar la energía de impacto independientemente de la dirección en la que se puede dar la colisión.

- *Compatibilidad*: la estructura debe ser capaz de reducir el alcance del golpe para accidentes en los que estén comprometidos dos tipos diferentes de vehículos.

### **2.3.3 Medidas de resistencia al impacto**

Cuando se analiza un problema de impacto como el que se trata en el presente proyecto las medidas más importantes a tener en cuenta conciernen a las estructuras de los objetos que impactan y a los ocupantes que van en su interior. Ambas medidas están relacionadas, ya que las consecuencias que se produzcan sobre la estructura son las que se transmitan sobre los ocupantes. Para comprender en qué consisten estas medidas se analiza cada una de ellas [12-13]:

- *Análisis estructural*

En el análisis estructural se estudia la estructura que está sometida a una colisión. Para ello, se mide la mayor cantidad de energía que la estructura es capaz de absorber durante el impacto. Otra medida que se analiza es la energía específica absorbida, en la cual se tiene en cuenta la masa de la estructura. Esta se emplea para comparar unas estructuras con otras y conocer cuáles son más eficientes. Además se analiza la fuerza de reacción y deceleración del objeto que impacta.

El objetivo de este proceso es el de limitar los valores máximos que son tolerables por la estructura y posteriormente por los humanos.

- *Análisis de lesiones*

En este análisis se considera el efecto sobre los ocupantes del vehículo que se establece en función de los límites de tolerancia de lesiones de los humanos. Se estudia la interacción entre los ocupantes en el interior del vehículo durante un choque y cómo los sistemas de retención pueden reducir el nivel de gravedad de una lesión.

### **2.3.4 Test de resistencia al impacto**

A pesar del progreso que se ha conseguido con las simulaciones por ordenador en el estudio de los problemas de impacto, la evaluación definitiva de un diseño se basa en pruebas experimentales [11]. Estas pruebas se llevan a cabo para garantizar la integridad estructural del vehículo y el cumplimiento de las normas establecidas.

Las pruebas dinámicas de ciertos componentes son esenciales para identificar el modo de aplastamiento, la capacidad de absorción de energía y la compresión en cuanto a su funcionamiento, lo que es esencial para el desarrollo de estructuras de prototipos y modelos matemáticos. Otro de los objetivos de las pruebas experimentales es el de determinar las lesiones humanas que se pueden producir a consecuencia del impacto.

Sin embargo, la complejidad de reproducir todas las condiciones del impacto y el coste de la prueba a escala real hacen que únicamente se puedan ensayar diseños nuevos y algunos componentes esenciales para la seguridad. Por ello, además de las pruebas experimentales se deben tener en cuenta informes en los que se reconstruyen y analizan accidentes, y los resultados basados en simulaciones realizadas por ordenador en las que se obtiene información que los otros métodos no aportan.

Por lo tanto, la validación de los sistemas de seguridad pasiva debe ser una combinación de pruebas de laboratorio y análisis computacional.

### **2.3.5 Requisitos estructurales**

Las estructuras sometidas a impacto deben cumplir ciertos requisitos para evitar que se produzcan lesiones sobre los pasajeros. Los requisitos más importantes son [11]:

- La estructura debe absorber la máxima energía cinética del impacto a través del plegado secuencial de los elementos de absorción de energía. Este proceso debe producirse de forma controlada durante el impacto para minimizar la energía que se transfiere al habitáculo de seguridad.
- La estructura debe preservar como mínimo un espacio de supervivencia para los pasajeros que mantenga los niveles de daño lo más bajo posible.

Un buen diseño en el vehículo permite alcanzar ambos objetivos de forma simultánea. Sin embargo, a estos requisitos esenciales para la seguridad se les debe añadir otros objetivos de diseño tales como el confort, la accesibilidad, la reducción de peso, el consumo de combustible, la reducción de costes, etc.

### **2.3.6 Mecanismos de deformación**

Cuando se procede a gestionar la energía durante una colisión se debe tener en cuenta el mecanismo de colapso de la estructura, ya que tiene relevante importancia en la determinación de la cantidad de energía absorbida.

La forma en la que se deforma un elemento que está sometido a una carga depende de:

- La geometría del elemento (dimensiones, imperfecciones, etc.).
- Propiedades del material.
- Condiciones de contorno. (empotramientos, apoyos, etc.)
- Condiciones de carga (duración y dirección de la carga).

En general los modos de colapso de una estructura se dividen en [11,13]:

- Plegado axial.

Este tipo de colapso se caracteriza por el plegado en forma de acordeón donde los pliegues pueden producirse de forma regular o irregular a lo largo del elemento. El plegado axial puro (Figura 12) es la forma colapso más deseable y eficiente, ya que incluye la absorción de la cantidad máxima de energía. Sin embargo, es el modo de colapso más difícil de alcanzar, ya que son pocas las ocasiones en las que se produce un impacto puramente axial entre los objetos que impactan.

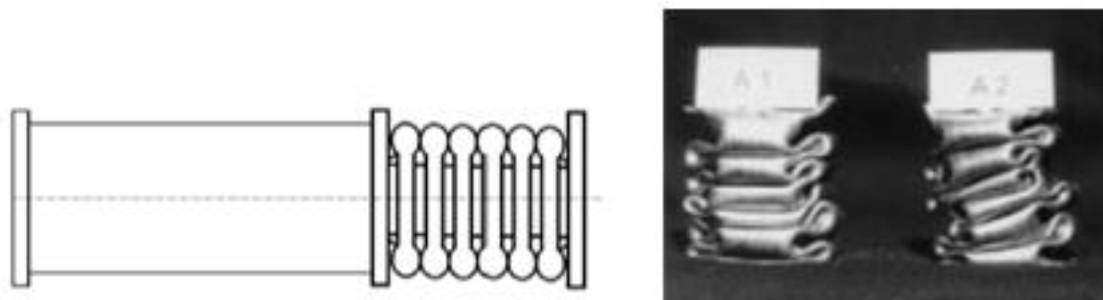


Figura 12. Modo de colapso axial [11]

➤ Plegado que produce flexión.

Se trata del modo de plegado más frecuente en el cual se produce la formación de una especie de “bisagras” y la estructura se va deformando alrededor de éstas. Esto se traduce en una pérdida significativa de la capacidad de la estructura para absorber el impacto.

Como se muestra en la Figura 13 esta modalidad de plegado implica una flexión global iniciada por la concentración de tensiones en un punto débil. Una vez que se supera el límite de flexión en dicho punto, la estructura se dobla.

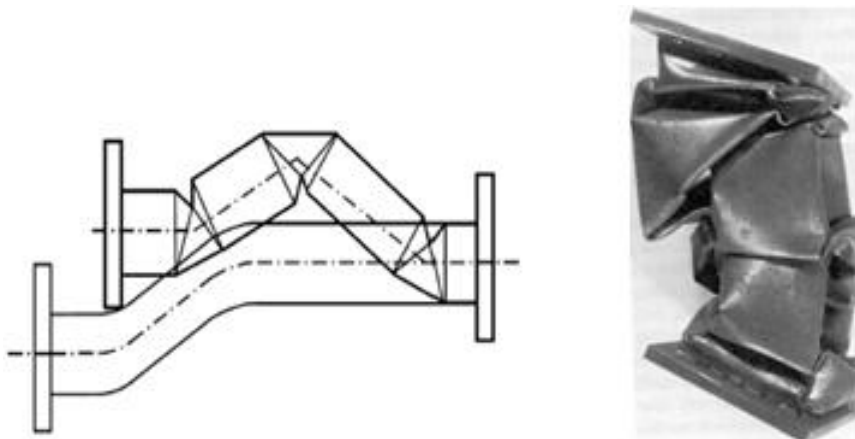


Figura 13. Plegado que produce flexión [11]

El análisis y la mejora en el diseño de estas estructuras son muy importantes pero conllevan un alto nivel de complejidad, ya que en los impactos intervienen



numerosos factores. Además, se debe tener en cuenta otra serie de consideraciones como [11]:

- En la zona de deformación primaria que se corresponde con aquellos elementos que van a absorber energía, el colapso estructural debe ser progresivamente uniforme. La sección delantera de la estructura es la parte que más energía absorbe.
- Se deben evitar las concentraciones de carga.
- El pandeo desemboca en colapso y posterior plegado. Se produce debido a las malas relaciones existentes entre el espesor y la longitud del elemento que se pliega. Este pandeo da lugar a ciertas inestabilidades de la estructura y en consecuencia a la pérdida de la capacidad de absorción de energía. Por lo tanto, debe evitarse en la medida de lo posible.
- Para la mayoría de los sucesos que se pueden dar en una colisión, las estructuras experimentan una combinación de los dos modos de colapso.

Todos los factores tratados sobre la resistencia al impacto muestran que el estudio de los fenómenos de impacto es complejo y requiere de altos niveles de conocimientos de muchas disciplinas.

## **2.4 Deformación programada**

Los vehículos deben ser diseñados de tal forma que las deformaciones ocurran fuera de aquellas zonas donde se encuentran las personas (habitáculo de seguridad) con el objetivo de aumentar las posibilidades de supervivencia después de un accidente.

La deformación programada consiste en la deformación secuencial de una estructura que recibe un impacto [15]. Se corresponde con aquellas zonas que se deforman progresivamente de forma controlada, absorbiendo la energía de la colisión.



**Figura 14. Curva fuerza-desplazamiento de una zona de deformación programada [16]**

La deformación programada es, sin duda, uno de los aspectos que ha experimentado un gran avance y, actualmente, es tal su importancia que no se concibe la fabricación de vehículos sin este sistema.

En los inicios de la industria automovilística y ferroviaria, los fabricantes diseñaban automóviles duros y resistentes al impacto para que la carrocería se deformase lo menos posible en caso de accidente [15]. El hecho de fabricar vehículos con estructuras poco deformables es un aspecto negativo para la seguridad de los ocupantes, ya que éstas no absorben correctamente la energía generada durante el impacto y, por lo tanto, se transmite la elevada fuerza sobre los ocupantes del vehículo pudiendo provocar lesiones graves o incluso muertes.

Este hecho denota que la filosofía “más fuerte es mejor” está en conflicto con los requisitos de protección de los ocupantes [17]. Hoy en día, los fabricantes han aumentado sus inversiones en la investigación de este tipo de estructuras. La tendencia a fabricar vehículos con carrocerías duras y fuertes ha desaparecido y ahora se fabrican vehículos que son seguros para los ocupantes.

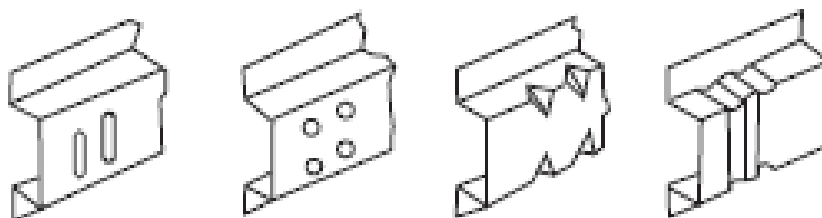
Para conseguir estos objetivos se emplean zonas con deformación programada las cuales se consiguen mediante [18]:

- Uso de materiales con diferentes resistencias que permitan un plegado secuencial.



**Figura 15. Zonas de diferentes resistencias para plegado [18]**

- Estructura con una geometría determinada. No se comporta igual una pieza recta que una que presente curvas.
- Disminución progresivamente el espesor de la pieza que consigue un efecto progresivo de deformación.
- Tratamiento térmico localizado. Una parte de la pieza se somete a un tratamiento térmico que aumenta su resistencia, quedando el resto con una resistencia menor
- Creación de puntos fusibles. Estos son variaciones estratégicas en la geometría que facilitan una deformación ordenada de la estructura. Se trata de debilitar o reforzar una determinada zona para que, ante un impacto, se deforme por ese punto. Se presentan en forma de muescas, relieves, taladros, perforaciones, etc. (Figura 16).



**Figura 16. Diferentes configuraciones de puntos fusibles [15]**

## **2.5 Elementos de absorción de energía**

Un elemento que absorbe energía es un dispositivo que convierte la energía cinética del objeto que impacta en otra forma de energía mediante un proceso de deformación plástica irreversible. .

La utilización de los elementos de absorción de energía es de uso diario ya que todos los días se producen accidentes en el sector de los medios de transporte. Se espera que estos elementos sean capaces de disipar la mayor cantidad de energía cinética posible, minimizando las fuerzas que se van a transferir sobre la estructura rígida. Por lo tanto, las necesidades de seguridad pasiva en sus diferentes aplicaciones, han producido un elevado número de investigaciones sobre los elementos que componen estas estructuras

### **2.5.1 Tipos de elementos de absorción de energía**

Entre los diferentes tipos de elementos de absorción de energía cabe destacar:

➤ *Elementos tubulares vacíos*

Las estructuras que utilizan tubos de pared delgada son capaces de disipar gran cantidad de energía mediante la deformación permanente de sus paredes. Además, son simples y tienen un peso relativamente bajo, por lo que son muy empleadas como estructuras de absorción de energía en automóviles y ferrocarriles [19-20].

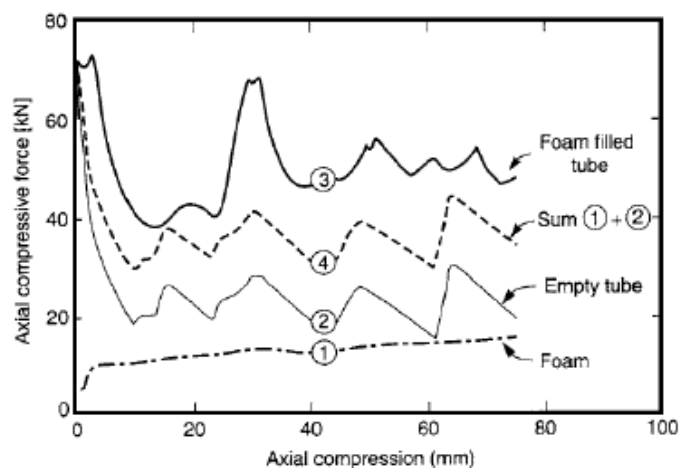
Un aspecto negativo que presentan estos elementos tiene lugar cuando el impacto no se produce en la dirección deseada (para la cual han sido diseñados). En caso de que el impacto sea oblicuo, las estructuras compuestas por elementos tubulares vacíos de pared delgada no se comportan correctamente y se suele producir un colapso por pandeo que produce flexión, de modo que pierden capacidad de absorción energética. Por lo tanto, cuando se emplean este tipo de estructuras, se debe prestar atención a los posibles escenarios de impactos a los que se puede exponer y además, se debe garantizar una mínima eficiencia que permita disipar suficiente energía en caso de impactos que presenten distintos ángulos de choque.

Para aquellos casos en los que los elementos tubulares están expuestos a cargas oblicuas la solución es que estos presenten una forma cónica [21] o un espesor gradual a lo largo de su longitud [22,23].

➤ Elementos tubulares rellenos

El uso de este tipo de estructuras rellenas está muy extendido ya que aumenta, en comparación con los elementos tubulares vacíos (Figura 17), la capacidad de absorción de energía tanto en flexión como en compresión [19,24].

Los materiales espumosos tienen la capacidad de soportar una gran deformación manteniendo un nivel de tensión bajo hasta llegar a la región de densificación.



**Figura 17. Comparación de curvas de fuerza-desplazamiento de un tubo vacío, una espuma y un tubo con una espuma en su interior.**

Dentro de los elementos tubulares rellenos se destacan dos tipos diferentes en función del tipo de espuma que posean:

- Espumas metálicas:

Se presentan como materiales que tienen gran capacidad de absorción de energía para estructuras ligeras. Estos materiales metálicos de gran porosidad se obtienen de metales básicos, siendo el aluminio el más empleado. Además, estas espumas presentan un elevado ratio tensión-masa, con lo que se reduce la masa de la estructura en gran medida en comparación con las estructuras metálicas convencionales [12].



Figura 18. Ejemplo de espuma metálica de aluminio [12]

Cuando se somete a una espuma metálica a compresión y, por tanto se incrementa la tensión, las celdas comienzan a colapsar mediante pandeo elástico, fluencia o fractura, dependiendo de la naturaleza del material. Una vez que todas las celdas han colapsado, el aumento en la deformación causa presión entre las paredes de la celda, incrementando de forma abrupta la tensión a partir de una determinada deformación denominada tensión de compactación (Figura 19) [25].

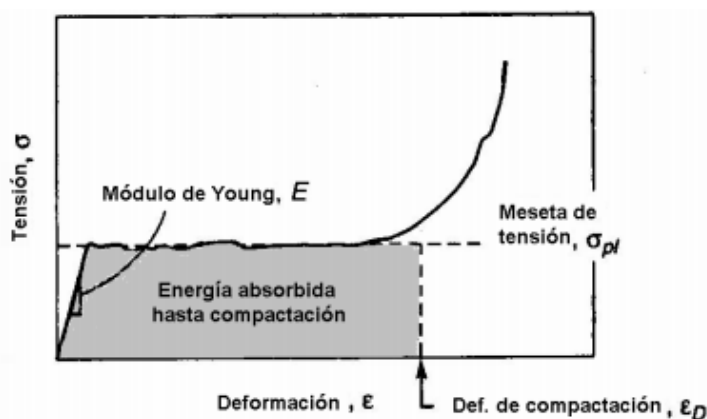


Figura 19. Curva tensión-deformación a compresión típica de una espuma metálica [ASHBY ET AL., 2000]

- Espumas poliméricas:

Se pueden utilizar en gran cantidad de aplicaciones como elementos de absorción de energía. Una de las características más importantes de las espumas poliméricas es que su capacidad de disipación es independiente de la dirección de la

carga. Por lo tanto, su inclusión en sistemas que puedan sufrir un impacto de forma oblicua afecta positivamente a la eficiencia global de la estructura [26,27].

➤ *Elementos tubulares con configuración multicelda*

También se considera la utilización de elementos multicelda como objeto en el diseño de este tipo de estructuras tubulares.

Se han llevado a cabo numerosos estudios en pruebas de impacto en las que se comparan diferentes configuraciones y formas de absorción, cuyos resultados muestran que el uso de sistemas multicelda produce una disminución de la fluctuación de la fuerza en comparación con tubos vacíos o relleno con materiales porosos [28].



**Figura 20. Elemento tubular con configuración multicelda [29]**

➤ *Elementos no tubulares*

Este tipo de estructuras se han utilizado en sistemas de protección frente a impacto a altas velocidades e incluso se han aplicado a vehículos militares. Los estudios demuestran que estas estructuras reducen significativamente las componentes verticales de la fuerza tras el impacto.

Sin embargo, la dificultad que presentan las estructuras tipo sándwich con entramado o celosía como núcleo a la hora de fabricarse da ventaja a las estructuras tubulares [30].



Figura 21. Elemento no tubular de disipación de energía [30]

## 2.5.2 Aplicaciones

Los principales casos de impactos se dan en medios de transporte. Sin embargo, no todos ellos tienen los mismos componentes estructurales para enfrentarse a un impacto. Por esta razón, el estudio y la mejora de los componentes de seguridad estructural ha aumentado especialmente en este sector.

Además, la absorción de energía mediante deformación se utiliza en otras aplicaciones industriales con el fin de aumentar la seguridad de los componentes.

### 2.5.2.1 Sector automovilístico

En el diseño de un vehículo es obligatorio proveer una zona suficientemente rígida para evitar que los ocupantes sufran algún tipo de daño, y otra zona de deformación programada que posibilite la disipación de la energía de forma eficiente durante el impacto [11]. La primera zona se conoce como habitáculo de seguridad y es el espacio en el cual viajan los ocupantes. La segunda zona hace referencia a aquellos elementos que permiten, gracias a su capacidad de absorción de energía, que el habitáculo de seguridad no se deforme en la medida de lo posible.

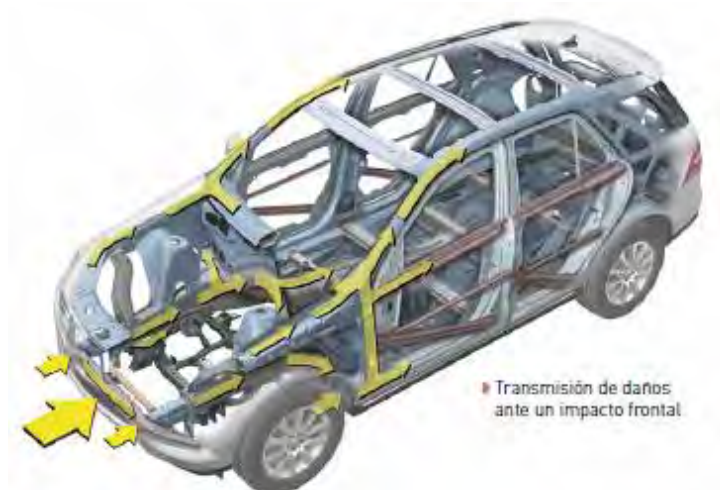
Las estructuras de deformación controlada más relevantes de un automóvil son las presentes en los subchasis delantero y trasero.





**Figura 22.** Secciones de un vehículo en función de su capacidad de deformación

El subchasis delantero se compone generalmente de dos parejas de largueros horizontales. Estos largueros, tanto los inferiores como los superiores, son los primeros elementos en absorber la energía en caso de que el vehículo reciba un impacto por la parte delantera. Para ello, se doblan de forma establecida de modo que se atenúe y absorba la energía de forma adecuada. Además, para transmitir la fuerza del impacto frontal a los largueros, estos están atornillados a una traviesa perpendicular muy rígida, que se hunde sin deformarse.



**Figura 23.** Líneas de transmisión de fuerzas en un vehículo ante un impacto

El impacto que menos daños produce en el coche y sus ocupantes es el completamente frontal. Si la trayectoria es oblicua, los daños son mayores puesto que el reparto de fuerzas a las traviesas no es uniforme.

El caso del subchasis trasero es similar al delantero. Unos largueros y una traviesa constituyen la base de la estructura de deformación controlada en un choque trasero y, a su vez, protegen el depósito de combustible.

Además, son necesarias unas estructuras laterales en la zona de las puertas que minimicen la intrusión en caso de impacto y una estructura del techo suficientemente fuerte que proteja a los ocupantes en caso de vuelco.

Estas estructuras son una de las causas más importantes del descenso en el número de víctimas y de la gravedad de los accidentes en las carreteras.

Por otro lado, en el sector automovilístico son especialmente conocidos los ensayos realizados por los fabricantes para garantizar la seguridad de los ocupantes frente a impactos. Los fabricantes están obligados por ley a realizar ensayos para asegurar que sus diseños cumplen con las regulaciones gubernamentales

Las regulaciones más importantes sobre pruebas de impacto cubren los choques frontales y laterales. Estas pruebas se sitúan en el marco del nuevo programa europeo de evaluación de vehículos (EuroNCAP) [31].

En lo que se refiere al impacto frontal, se simula un vehículo a 56 km/h que impacta con una barrera como réplica de otro vehículo con un desplazamiento del 40%.

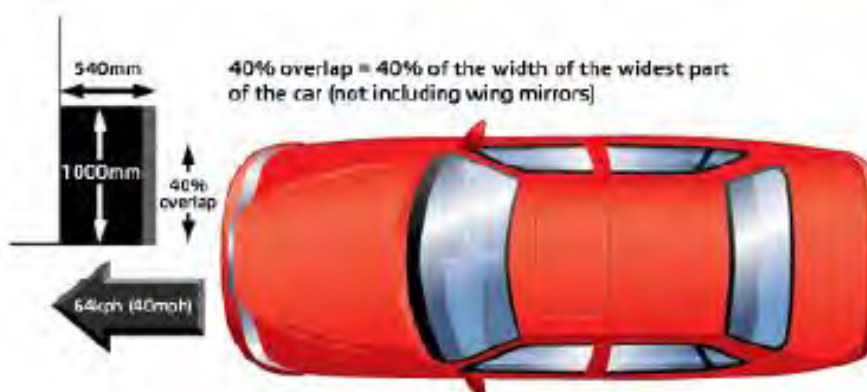
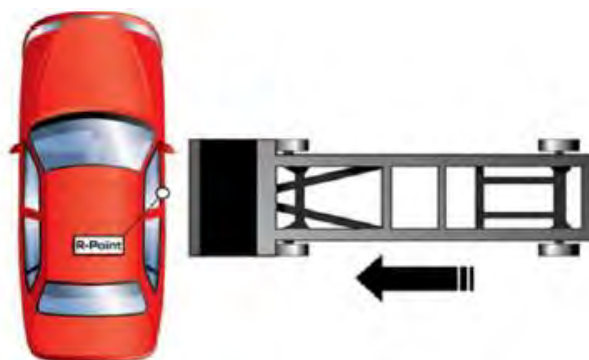


Figura 24. Ensayo impacto frontal [31]

Por otro lado, el ensayo de impacto lateral se realiza simulando un vehículo que colisiona sobre el lateral a 50 km/h.



**Figura 25. Ensayo impacto lateral [31]**

En estas pruebas el vehículo impacta contra una barrera rígida, de modo que se puede evaluar la eficacia global de la seguridad pasiva del vehículo en caso de que ocurra una colisión. Para ello, se comprueban los daños en los ocupantes a través de muñecos equipados con sensores que permiten obtener las fuerzas de desaceleración.

El análisis del impacto se puede realizar en dos etapas: en la primera etapa, el vehículo golpea una barrera u otro vehículo y esto produce un aplastamiento de la estructura con la consecuente disipación de energía. En la segunda etapa, el muñeco se mueve libremente contra el interior del vehículo o se mueve con moderación si se restringe su movimiento. Las posibles lesiones que pueden ocurrir durante la segunda etapa deben situarse debajo de un umbral de acuerdo a los límites de seguridad [11].

### **2.5.2.2 Sector aeronáutico**

En el ámbito de la aeronáutica parece difícil alcanzar un diseño a prueba de colisiones debido a la gran velocidad y ligereza de los vehículos [1]. Sin embargo, la resistencia frente a impacto es una de las principales medidas de seguridad en los aviones. La prueba de que la estructura presenta la suficiente capacidad de absorción de energía en caso de aterrizajes de emergencia es una obligación para la certificación de los mismos.

Para ello, los aviones presentan una estructura denominada fuselaje que es encargada de absorber la energía cinética durante el impacto a través de su deformación [32]. De este modo se preserva un espacio de supervivencia dentro de la cabina y las fuerzas de impacto que se transmiten sobre los pasajeros se sitúan por debajo del límite establecido de daños sobre las personas.



**Figura 26.** Parte del fuselaje del avión donde van los pasajeros.

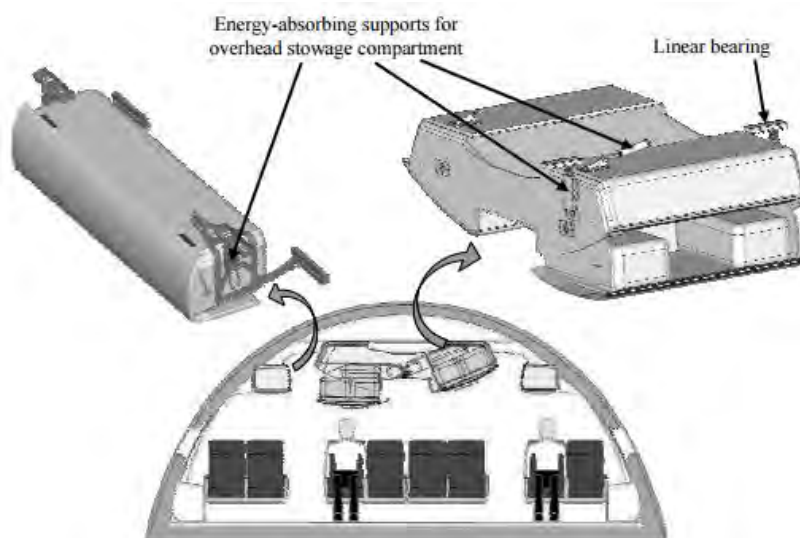
Una de las pruebas a la que se somete la sección del fuselaje para comprobar su resistencia al impacto es la caída de la estructura a gran escala [33]. Estas pruebas son adecuadas para evaluar la aceleración vertical que sufren los ocupantes. Este caso de carga puede producir severas lesiones sobre la columna vertebral y los órganos internos de las personas. La Figura 27 muestra una prueba de carga vertical.



**Figura 27.** Estructura sin deformar (a) y estructura deformada (b) [33]

También se realizan pruebas de cargas horizontales en las que la desaceleración puede producir lesiones en la cabeza de los ocupantes al impactar ésta sobre el asiento que le precede. Estas pruebas se realizan, por ejemplo, para simular amerizajes forzosos o aterrizajes en el que falla el tren de aterrizaje delantero.

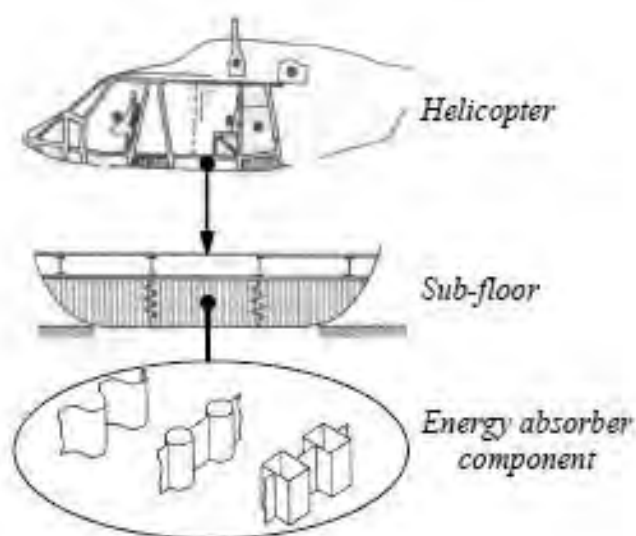
Además se realizan otro tipo de pruebas como el impacto de pájaros, en el cual se lanzan aves sobre la zona del borde de ataque y las alas, que permiten comprobar los daños que sufren estas zonas; y pruebas sobre los compartimentos de almacenamiento de maletas que se sitúan encima de las cabezas de los pasajeros para prevenir el desprendimiento de estas estructuras (Figura 28) [34].



**Figura 28. Elementos de absorción de energía en el compartimento de almacenamiento de maletas situado encima de los pasajeros [34]**

Estos elementos encargados de absorber energía también se emplean en los helicópteros (Figura 29). Si un helicóptero está sometido a carga vertical, se crean puntos de acumulación de tensiones en la estructura que se encuentra en el subsuelo, lo que da lugar a grandes deceleraciones que pueden causar daño en los ocupantes [35]. Por este motivo, es en esta zona donde se insertan principalmente los elementos de absorción de energía cuando se diseña un aparato como este.





**Figura 29. Componentes de absorción de energía de un helicóptero [12]**

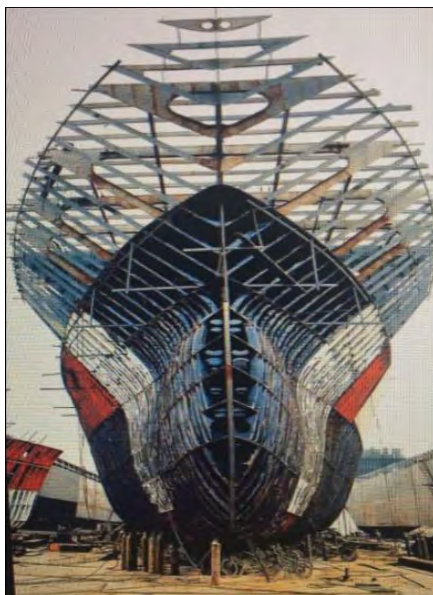
### **2.5.2.3 Sector naval**

Debido al aumento del transporte de personas y mercancías a través del transporte marítimo es importante analizar y mejorar las estructuras de los barcos ante una posible colisión.

La mayor parte de las inversiones en seguridad en este sector son en prevención de accidentes (seguridad activa). Sin embargo, también se invierte en mejorar las estructuras de los barcos con el fin de evitar grandes catástrofes en caso de accidente.

Los tipos de colisiones más importantes a las que se puede ver sometido un barco son: impacto contra otro barco, contra un puente, contra icebergs y sobre estructuras portuarias. Estas colisiones se caracterizan por la relativa baja velocidad del impacto y la enorme masa que se ve involucrada en caso de tratarse de barcos de elevadas dimensiones. En el caso de veleros o pequeños barcos el impacto se caracteriza por su mayor velocidad y la resistencia de los materiales más ligeros (materiales compuestos, normalmente fibra de vidrio).

Para enfrentarse a una colisión, los barcos presentan una estructura interna de cuadernas y larguerillos, un forro de elevado espesor y una estructura externa o casco que también actúa como elemento de seguridad en caso de impacto.



**Figura 30.** Estructura interna de un buque

#### **2.5.2.4 Otras aplicaciones**

Otras de las aplicaciones comunes que emplean los elementos de absorción de energía son las protecciones en las carreteras con el uso de barreras flexibles [36] de forma que permitan una deformación suficiente para disipar o desviar la energía de impacto, y la protección de las tuberías, que a consecuencia de los cambios de presión que se pueden producir en los fluidos que transporta, pueden doblarse o fracturarse.

### **2.6 Industria ferroviaria**

#### **2.6.1 Introducción**

La historia de la investigación sobre la resistencia a los choques de vehículos ferroviarios es relativamente corta [17]. La mayor parte de los proyectos han sido completados durante los últimos años gracias a los avances en tecnología, la capacidad

del modelado por ordenador y el *know-how* sobre esta temática. Un ejemplo de esto es el desarrollo de los proyectos europeos *Traincol*, *Safetrain* y *Safetram* en los que se incluye: revisión de los accidentes pasados y sus consecuencias, establecimiento de escenarios de colisión de referencia para trenes y tranvías, desarrollo de una normativa general para el diseño estructural y directrices en los procesos de validación [14].

## **2.6.2 Seguridad pasiva en la industria ferroviaria**

La industria ferroviaria se encuentra en continuo crecimiento. El volumen de tráfico y la velocidad de los trenes es cada vez mayor. Además, el transporte ferroviario siempre se ha considerado como uno de los medios de transportes más seguros debido a que el número de accidentes que se producen es menor que en otros medios de transporte. Sin embargo, aun siendo menos frecuentes, los accidentes ferroviarios pueden tener efectos catastróficos debido a sus grandes dimensiones y a su elevada velocidad en algunos casos [37]. En el caso de un accidente ferroviario no debe considerarse únicamente el efecto del impacto sobre el propio vehículo, sino que también se debe tener en cuenta las consecuencias sobre las estructuras con las que puede impactar y sus consecuencias.

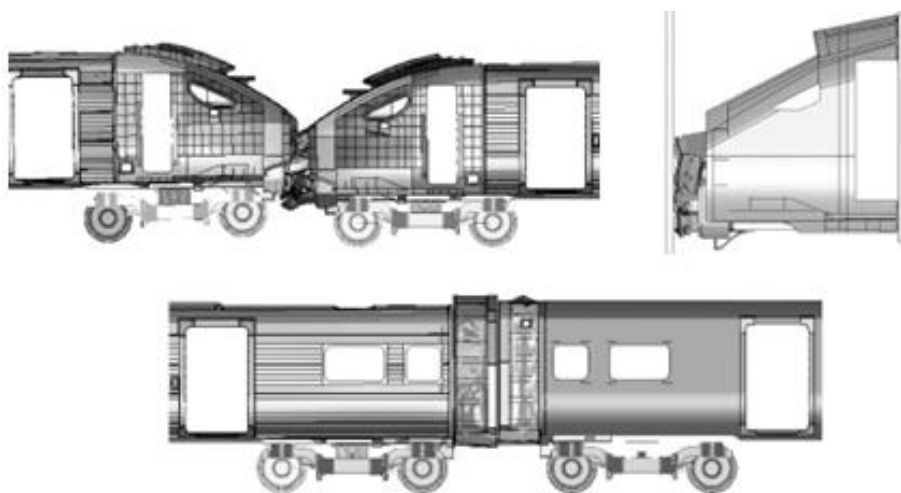
Todo esto exige un aumento en el estudio y la mejora de las estructuras de protección de los pasajeros de modo que se cumplan los estándares de seguridad. Para los fabricantes, contar con el mayor nivel de conocimiento en materia de control de gestión de energía de impactos en una amplia gama de condiciones es un requisito indispensable que garantiza el éxito.

Cuando se analiza el comportamiento de un tren frente a un impacto, hay que tener en cuenta que su comportamiento está influenciado por las interacciones entre los vagones, la naturaleza de los acopamientos entre ellos y el propio colapso de cada vagón. Además, generalmente, un accidente se puede dividir en dos fases que se denominan colisión primaria y colisión secundaria. Las características que presentan son [14, 37,38]:



➤ Colisión primaria

Esta fase corresponde al impacto que se produce entre la estructura del tren y el objeto contra el que impacta. Durante esta fase, los elementos de absorción de energía deben deformarse de modo que se garantice una zona de seguridad para los pasajeros (colapso estructural limitado) y que se minimice la carga transmitida a los pasajeros como consecuencia de las deceleraciones.



**Figura 31. Tipos de impactos en ferrocarriles [4]**

Los elementos de absorción de energía que participan en este proceso de deformación controlada son [3,16] :

- *Acoplador*: es el mecanismo que posibilita la conexión de varios vehículos ferroviarios.
- *Anti-climber*: este sistema evita que un tren monte sobre otro. Las superficies de contacto del *anti-climber* se bloquean entre sí antes de que se produzca ninguna deformación estructural del vehículo, controlando de este modo el movimiento vertical.
- *Elementos de absorción de energía*: estos se corresponden con aquellos tubos de deformación que absorben la mayor cantidad de energía en caso de impacto.
- *Amortiguadores*: son los elementos que primero actúan frenando el golpe de forma progresiva mediante su deformación controlada.

- *Deflectores*: están diseñados para limitar la fuerza de impacto, desviando o creando un impacto “tangencial”. Dicho deflector no debe ser completamente rígido, sino que debe permitir un cierto grado de movimiento para absorber energía.

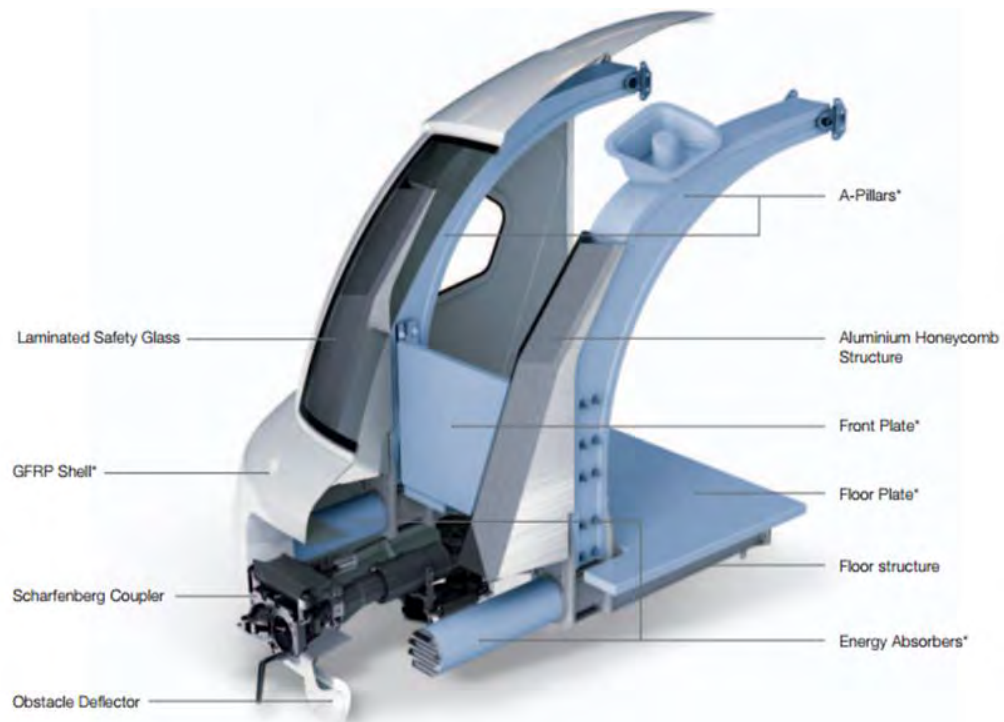


Figura 32. Elementos de absorción de energía de un ferrocarril [39]

Estos elementos se deforman en diferentes fases, que producen una serie de fuerzas durante su recorrido (Figura 33).

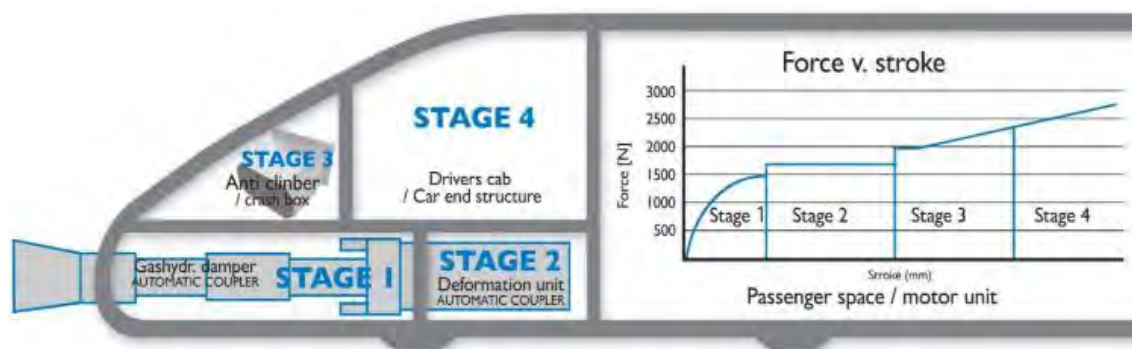
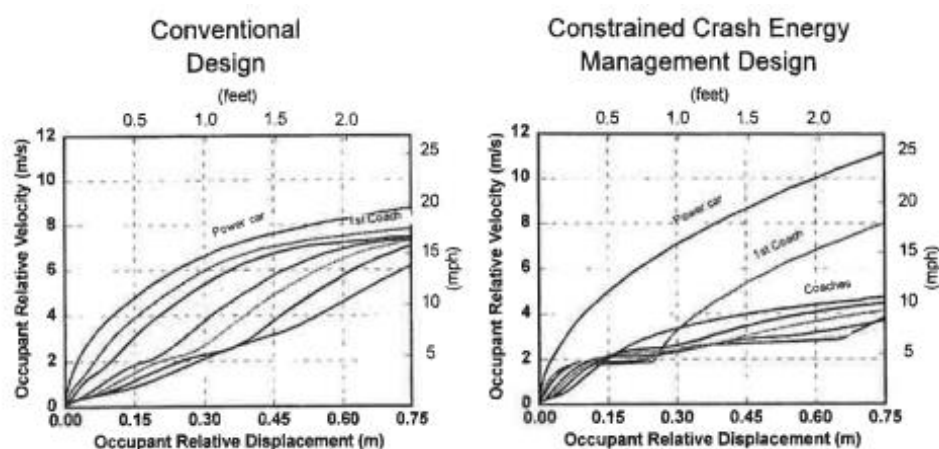


Figura 33. Etapas de deformación de un ferrocarril

➤ Colisión secundaria

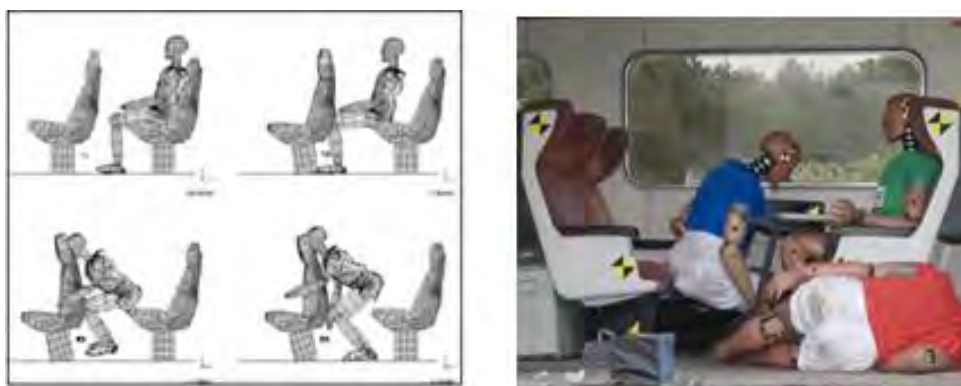
En esta segunda fase del impacto se analiza el diseño de interiores para reducir al mínimo las lesiones por impacto secundario. Este impacto secundario hace referencia al choque que se produce entre los ocupantes y los elementos que hay en el interior del vagón tales como asientos, mesas, otros ocupantes, etc. [37]

El diseño de interiores debe cumplir una serie de requisitos específicos que garanticen la seguridad de los pasajeros.



**Figura 34.** Comparación del desplazamiento relativo de los ocupantes de un tren en un diseño convencional y en un diseño óptimo de elementos de absorción de energía [37]

Para conocer dichos requisitos se realizan pruebas que muestran las interacciones entre los pasajeros y el interior [38], tal y como muestra la Figura 35.



**Figura 35.** Pruebas sobre los pasajeros de un vehículo ferroviario

Por lo tanto, se puede concluir que, hoy en día, los ferrocarriles se diseñan de forma óptima para poder enfrentarse a una sollicitación dinámica de este tipo. Sin embargo, un diseño óptimo y adecuado no es sinónimo de seguridad plena, por lo que se siguen realizando esfuerzos en la mejora de las medidas de seguridad pasiva.

### **2.6.3 Normativa**

La norma que se emplea en el diseño de elementos de seguridad pasiva de un ferrocarril es la UNE-EN 15227:2008+A1:2011 “*Aplicaciones ferroviarias. Requisitos de resistencia a la colisión para cajas de vehículos ferroviarios*” [40].

Esta proporciona un marco normativo que determina las condiciones de diseño de los vehículos ferroviarios, de modo que los permita enfrentar con garantías los accidentes más comunes y sus riesgos asociados.

Los requisitos son compatibles con los de las normas EN 12663 “*Requisitos estructurales de los vehículos ferroviarios*” y EN 50126 “*La especificación y demostración de la fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad (RAMS)*”. Sin embargo, los requisitos mínimos de seguridad no cubren todas las posibles situaciones de accidente pero proporcionan un nivel de protección consistente con los probables riesgos de colisión.

#### **2.6.3.1 Requisitos mínimos de protección**

En esta parte se especifican los requisitos funcionales mínimos necesarios para proteger a los viajeros. Proporciona la definición de los requisitos y se indican los métodos para lograrlos y validarlos.

Las medidas que proporcionan protección a los ocupantes en caso de accidente son:

1. *Resistencia estructural*: es esencial para asegurar que las cargas que se originen como consecuencia de un impacto se transfieran correctamente.

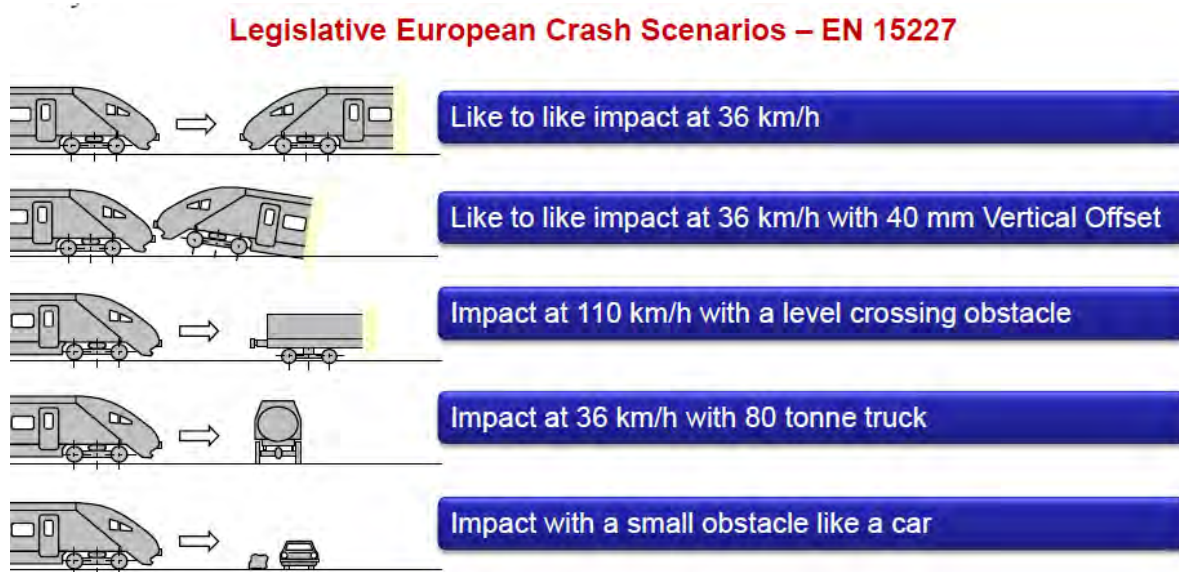
2. *Absorción de energía en caso de colisión.* La energía debe absorberse de manera controlada de forma que no se produzcan efectos indeseables sobre la tripulación y los pasajeros.
3. *Preservar el espacio para supervivencia y la integridad estructural.* La resistencia contra aplastamiento en las zonas ocupadas por personas es un requisito esencial para proteger su seguridad.
4. *Limitar la desaceleración.* La desaceleración global del vehículo debe limitarse de acuerdo a la fuerza máxima aceptable por parte de la estructura durante su colapso.
5. *Resistencia a la intrusión en el espacio de supervivencia.* Los obstáculos que se encuentran por debajo de la altura de la estructura del tren, pasarán por debajo de este y, por tanto, pueden producir tanto una intrusión en el espacio de supervivencia, así como el descarrilamiento del tren.
6. *Reducir el riesgo de descarrilamiento y limitar las consecuencias de golpear a un cierre de la vía.*

#### **2.6.3.2 Tipos de accidentes**

La base de los requisitos de resistencia al impacto están representadas por aquellas situaciones más comunes y en la que resultan el mayor número de víctimas tras una colisión. Estas son:

1. Un impacto frontal entre dos unidades de tren idénticas.
2. Impacto frontal con trepado de un tren sobre otro.
3. Tren impacta frontalmente contra un obstáculo pesado.
4. Tren impacta con un obstáculo bajo.





**Figura 36. Tipo de impacto según la norma EN-15227**

Las estructuras deben tener como mínimo suficiente capacidad de absorción de energía para cada escenario de colisión.

La deceleración media en los espacios de supervivencia debe limitarse en la medida de lo posible a 5 g, y nunca debe sobrepasar el valor de 7,5 g. Generalmente se aceptan mayores niveles de desaceleración en la cabina, zona que se encuentra cerca del punto de impacto [4].

### **2.6.3.3 Proceso validación de resistencia a los impactos**

La evaluación de la seguridad pasiva de los trenes se establece para unidades de trenes completos. Como no resulta práctico ni económico evaluar todos los trenes mediante pruebas experimentales, los objetivos de seguridad son validados a través de simulaciones dinámicas. Estas son suficientes para validar aquellas zonas estructurales cuya deformación es limitada. Sin embargo, para los nuevos diseños de trenes y en las zonas que presentan grandes deformaciones, generalmente se suelen llevar a cabo pruebas de las estructuras [41].

Por tanto, el programa de validación es un método que combina las pruebas experimentales y la simulación numérica.



**Figura 37. Proceso de validación en la estructura de un ferrocarril**

#### **2.6.4 Toperas ferroviarias**

Las toperas hacen referencia a aquellos elementos estructurales de seguridad pasiva, situados generalmente al final de las vías, que reducen las consecuencias (muertes y lesiones graves) en caso de que se produzca un accidente. La instalación de este tipo de estructuras protege a los pasajeros, al material rodante y a las infraestructuras.



**Figura 38. Tipos de accidentes que se producen por el uso de toperas no óptimas.**

El diseño de las toperas está relacionado con la longitud del final de vía. Cuanta menor longitud presente la topera, más bajos son los costes de construcción y

explotación. Por el contrario, una longitud mayor ofrece más seguridad para la parada de los trenes.

Por lo tanto, se debe realizar un estudio detallado de la topera en función del tipo de trenes que vayan a estacionar en la vía, ya que un sobredimensionamiento de la topera no es una solución de validez universal. [42].

#### **2.6.4.1 Tipos de toperas ferroviarias**

Las toperas ferroviarias pueden clasificarse principalmente en dos grandes grupos, las toperas rígidas y las toperas deslizantes [2].

##### **1. Toperas deslizantes :**

Este tipo de tope permite la detención del tren a través de frenos. El vehículo impacta sobre la topera y esta se desplaza frenando sobre las vías hasta conseguir detener al tren. Dentro de las toperas deslizantes se pueden encontrar:

##### *a) Toperas deslizantes de fricción*

Las toperas deslizantes de fricción están diseñadas para disipar la energía del impacto de manera controlada mediante la acción deslizante de las zapatas de fricción situadas entre el bastidor y el perfil del raíl. Este sistema puede combinarse con sistemas hidráulicos de absorción de energía y proporcionar toperas reutilizables para impactos de hasta 25 km/h, y distancias de deslizamiento controladas para altas velocidades.



**Figura 39. Toperas deslizantes de fricción**



*b) Toperas deslizantes de fricción no hidráulicas*

Este tipo de tope mecánico se utiliza normalmente en líneas de metro y líneas ferroviarias. Está diseñado para soportar diversos tipos de impactos centrales y laterales con *anti-climbers*. El número de zapatas de fricción depende de la masa del tren, la velocidad de impacto y la deceleración necesaria para detener el vehículo.



**Figura 40. Toperas deslizantes de fricción no hidráulicas**

**2. Toperas rígidas.**

Son toperas que posibilitan la detención del tren a través de una deformación en forma de plegado secuencial del propio tope. El vehículo impacta sobre la topera y ésta se deforma plásticamente absorbiendo la energía cinética del ferrocarril.

*a) Toperas fijadas al suelo*

Son sistemas que se colocan al final de las vías y cuyos bastidores se fijan directamente sobre los raíles. Generalmente se utilizan en conjunto con sistemas hidráulicos que permitan una mayor absorción de energía.



**Figura 41. Toperas fijadas sobre el suelo**

*b) Toperas fijas sobre bloques de hormigón*

Se utilizan para disipar la energía de impacto soportada en una base fija de hormigón. Normalmente se utilizan con una barra de choque para que interactúen con el material rodante.



**Figura 42. Toperas fijas sobre bloque de hormigón**

## **2.7 Material empleado en elementos de absorción de energía**

Cuando se realiza la selección del material para el diseño de una estructura se tiene en cuenta cuál es el propósito principal de la misma. En el caso de los elementos estructurales estudiados en el presente proyecto, lo que se pretende es transformar controladamente la energía cinética del tren en energía inelástica a través de una deformación plástica controlada que asegure la fiabilidad del proceso. Estos elementos están diseñados para soportar grandes cargas de impacto lo que da lugar a grandes deformaciones y posibles fracturas que originan cambios en su geometría inicial. Por ello, la mayor parte de estas estructuras se componen de materiales dúctiles capaces de deformarse de forma sostenible sin fracturarse entre los que cabe destacar: aceros de alta resistencia, aleaciones de aluminio, materiales compuestos y materiales no metálicos (GFRP, espumas poliméricas, etc.)[19, 22, 23, 25].

### **2.7.1 Aluminio en la industria ferroviaria**

El aluminio ha sido usado en la industria ferroviaria durante muchos años y su primera aparición tuvo lugar en un ferrocarril de transporte de mercancías en el año 1931, mientras que no fue hasta 1935 cuando apareció en un tren de pasajeros.

El éxito del uso del aluminio en la construcción de la estructura del ferrocarril ha sido posible gracias a la aparición de técnicas de extrusión de grandes perfiles. La posibilidad de realizar perfiles cerrados mediante extrusión permitió diseños con secciones más ligeras, rígidas, complejas y eficientes que podían ser fácilmente soldables entre sí, lo que posibilitaba la fabricación de estructuras con una precisión dimensional muy buena a un coste relativamente bajo [43].

Las principales propiedades del aluminio son: ductilidad, maleabilidad, baja densidad, resistencia a corrosión, conductividad eléctrica y térmica, etc. Además, el aluminio se caracteriza por su eficiencia al reducir el peso de la estructura, su gran presencia en la corteza terrestre que lo convierte en un material sostenible, su mayor capacidad de absorción de energía respecto de otros materiales y su elevado rendimiento[44].

Por estas razones, el aluminio es el material idóneo a emplear para las estructuras encargadas de absorber energía durante un impacto.



## *Capítulo 3*

# *METODOLOGÍA Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA*

## 3 Metodología y definición del problema

### 3.1 Método de los elementos finitos

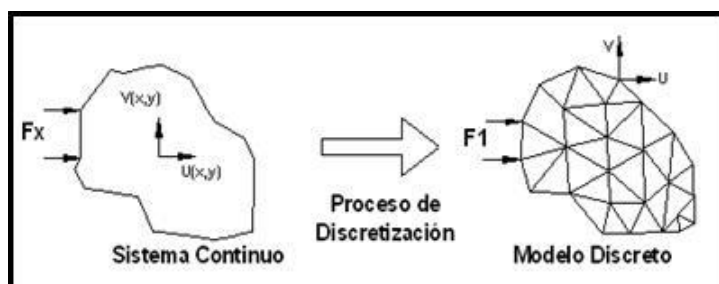
El método de elementos finitos (MEF) es un procedimiento de cálculo que permite reproducir comportamientos estructurales complejos mediante la solución de ecuaciones diferenciales que caracterizan el comportamiento físico del problema. Este método ha adquirido una gran importancia en la solución de problemas ingenieriles, ya que permite resolver problemas que no se pueden resolver mediante otro tipo de métodos matemáticos más sencillos.

El desarrollo de los elementos finitos ha estado unido al cálculo estructural desde 1940. Antes de que surgiera el método de los elementos finitos era necesario realizar prototipos de los modelos, ensayarlos y realizar mejoras de los mismos de forma iterativa. Este proceso tenía como consecuencias un excesivo coste económico y un elevado tiempo en el desarrollo del modelo. El uso del MEF da la posibilidad de obtener un modelo de cálculo del problema a investigar más económico en comparación con un prototipo. Además, permite acercarse en gran medida al diseño óptimo del modelo de estudio, ya que da la posibilidad de conocer los parámetros que van a gobernar dicho problema. Sin embargo, se debe tener en cuenta que se trata de un método aproximado de cálculo y que, por lo tanto, sigue siendo necesario realizar prototipos que se ensayen [45].

El método de los elementos finitos se ha desarrollado en gran medida gracias a los avances informáticos y está considerado como una de las herramientas más importantes y potentes para la resolución de problemas ingenieriles. Actualmente se encuentra en una fase de gran expansión y es ampliamente utilizado en la industria [46]. También se adapta fácilmente a problemas de transmisión de calor, mecánica de fluidos, para calcular campos de velocidades y presiones (mecánica de fluidos computacional, CFD) o de campos electromagnéticos. Por lo tanto, debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos, sus aplicaciones son numerosas.

La idea del método es la de dividir un sistema continuo en un conjunto de pequeños elementos (no-intersectantes) que están interconectados mediante nodos. Las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del sistema continuo también rigen el los elementos. De este modo se pasa de un sistema continuo con infinitos grados de libertad, que es regido por un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela mediante un sistema de ecuaciones que pueden o no ser lineales [47-48].

En el problema que se analiza mediante este método se distinguen dos partes: el dominio, el cual es el espacio geométrico en el que se analiza el problema, y las condiciones de contorno, que hacen referencia a las variables conocidas tales como cargas, desplazamientos, temperaturas, voltajes, etc.



**Figura 43. Proceso de discretización de un sistema continuo**

Cuando se resuelve un problema mediante el método de los elementos finitos se discretiza el dominio en subdominios (elementos) mediante puntos (caso lineal) , líneas (caso bidimensional) o superficies (caso tridimensional).

Estos elementos presentan las siguientes características:

- Cada elemento ocupa una zona del dominio y especifica los parámetros característicos que se asocian a los nodos.
- Los nodos son los puntos de unión de cada elemento con sus elementos contiguos. Por lo tanto, un nodo puede pertenecer a varios elementos. En el caso de elementos estructurales las incógnitas son los desplazamientos de los nodos.

- El conjunto de nodos con sus relaciones de adyacencia se denomina malla. De acuerdo con las relaciones de conectividad se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad.
- La solución del sistema completo se realiza mediante un ensamblaje de elementos.
- Los resultados quedan definidos a partir del comportamiento de los nodos mediante las denominadas funciones de forma.
- A medida que se realiza una malla más fina, es decir, con un mayor número de elementos y nodos, la solución numérica calculada converge de manera más precisa hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones. Por tanto, la precisión del método depende del tamaño de la malla y la homogeneidad de los elementos.

Además, para cada uno de los elementos finitos en los que se divide la estructura se tienen las siguientes consideraciones [1, 47,48]:

- Los desplazamientos en un punto cualquiera  $\{u\}(X,t)$  del interior del elemento pueden obtenerse a través de la siguiente expresión :

$$\{u\}(X,t) = \sum_{n=1}^N [N_n](X) \cdot \{u_n\}(t)$$

Donde  $\{u_n\}(t)$  son los desplazamientos nodales, incógnitas discretas a resolver en cada intervalo de tiempo y  $[N_n](X)$  son las funciones de forma que definen la interpolación espacial. La expresión anterior implica que ambas aproximaciones (temporal y espacial) se realizan de forma independiente.

- Las acciones exteriores que actúan sobre el sólido se sustituyen por un sistema equivalente de acciones de fuerzas y momentos que actúan sobre los nodos  $\{P\}$  (fuerzas de volumen, de superficie y fuerzas puntuales).
- Para hallar la matriz de rigidez del sólido  $[K]$  es necesario ensamblar las matrices de rigidez de los diferentes elementos.

- La relación entre las acciones exteriores y los desplazamientos de cada uno de los nodos viene dada por la siguiente expresión:

$$[K] \cdot \{u_n\} = \{P\}$$

Cabe destacar que de esta expresión son conocidas la matriz de rigidez de la estructura y el vector de cargas  $\{P\}$ , siendo los desplazamientos nodales las incógnitas.

- Conocidos los desplazamientos se pueden hallar las deformaciones y conocidas las deformaciones las tensiones con las siguientes expresiones matriciales (relaciones cinemáticas y constitutivas):

$$\{\varepsilon\} = [L] \cdot \{u\} = [L] \cdot [N] \cdot \{u_n\} = [B] \cdot \{u_n\}$$

$$\{\sigma\} = [D] \cdot \{\varepsilon\}$$

Siendo  $[D]$  la matriz de coeficientes del sistema de ecuaciones constitutivas y  $[L]$  un operador conocido.

En los problemas de impacto llevados a cabo mediante un programa de elementos finitos, en primer lugar, se realiza la discretización en el espacio, convirtiendo las ecuaciones en derivadas parciales en un conjunto de  $N$  ecuaciones diferenciales ordinarias [1]. Estas se resuelven a continuación mediante un método directo de integración en el tiempo (obtención de la solución en el instante  $t_{n+1}$ , a partir de los valores en instantes anteriores) empleándose en este caso el método explícito.

Además, en los problemas de impacto asociados a discontinuidades y fenómenos no lineales es aconsejable emplear elementos de bajo orden de interpolación siendo este orden determinado por el número de nodos utilizados en el elemento (discretización espacial) [1].



### 3.1.1 Método explícito

El uso del método explícito para la resolución de problemas de impacto (a menudo fuertemente no lineales), en los que los sucesos ocurren en pequeños intervalos de tiempo supone una gran aproximación a la realidad. Este tipo de problemas se necesitan resolver mediante integración directa en el tiempo [1, 12, 13].

Una característica que posee es el cálculo del modelo elemento a elemento, en el que no se plantean sistemas de ecuaciones globales acoplados, lo que permite el cálculo en paralelo ahorrando tiempo computacional. Constituye la forma más directa para avanzar en el tiempo. En dicho método se establecen las ecuaciones dinámicas en el instante  $t_n$  para calcular las variables  $x_{n+1}$ . La integración progresa paso a paso, es decir, en cada ciclo de integración se obtienen los valores de las variables en el instante  $t_n$  a partir de los valores de las variables en el instante  $t_{n-1}$ , partiendo de las condiciones iniciales del problema. [1]

## 3.2 Abaqus

El software seleccionado para la realización del proyecto es Abaqus, cuya versión empleada para la realización de las simulaciones es la 6.13-4. De él se obtiene la información requerida, a través de gráficas, datos y la propia visualización, para el análisis del comportamiento de la estructura de estudio y la selección del modelo final.

Abaqus es un programa ofimático, dedicado a la resolución de problemas de ciencias e ingeniería, basado en el método de los elementos finitos y desarrollado por Simulia, empresa propiedad de Dassault Systemes S.A.

Este software comercial es uno de los programas de simulación de elementos finitos más extendidos y potentes ya que permite resolver casi todo tipo de problemas (estructurales, de transferencia de calor, difusión de masa, análisis termoeléctricos, acústicos, electromagnéticos, de dinámica de fluidos, etc.). Abaqus está presente en los sectores automovilístico, aeroespacial, ferroviario así como en el ámbito académico e

investigador gracias a la capacidad que posee para adaptarse a las diferentes necesidades de cada problema.

Además abaqus consta de varios programas entre los que cabe destacar Abaqus/Standard y Abaqus/Explicit. Abaqus/Standard formula el problema de elementos finitos en forma implícita, mientras que Abaqus/Explicit está orientado a la resolución de problemas dinámicos formulados de forma explícita.

Como ya se explicó anteriormente, dado que el proyecto está orientado al estudio del comportamiento frente a impacto, el solver empleado es Abaqus/Explicit [49].

### **3.2.1 Análisis dinámico**

Abaqus ofrece varios métodos para resolver problemas dinámicos en los cuales las fuerzas de inercia son importantes, por lo que es necesario especificar la densidad o masa del tipo de material empleado. El método de integración directa debe ser usado cuando se estudia respuesta dinámica no lineal .

Se puede distinguir entre los siguientes tipos de análisis dinámico : análisis dinámico implícito, análisis dinámico explícito, análisis dinámico direct-solution steady-state, procedimiento para la obtención de la frecuencia natural, procedimiento para la obtención de valores propios complejos, análisis dinámico modal, análisis dinámico mode-based steady-state, Subspace-based steady-state dynamic analysis, análisis de espectros de respuesta y análisis de respuesta aleatoria[49].

El análisis que se emplea en el caso de este proyecto es un análisis dinámico explícito.

## **3.3 Definición del problema**

En este apartado se lleva a cabo una presentación del problema específico que se estudia. Para ello se definen las siguientes características: material que se emplea,

condiciones de contorno, geometría de los elementos, tipo de elementos, los contactos existentes entre las diferentes partes y el análisis de sensibilidad la malla.

De este modo se puede entender con más precisión en qué consiste el modelo que se va a estudiar y optimizar en el presente proyecto.

### 3.4 Definición del ensayo

El tipo de ensayo dinámico que se lleva a cabo en las simulaciones es el de un impacto entre un tren que lleva en su parte delantera un elemento de absorción de energía y una topera ferroviaria empotrada en el terreno. Para ello, a continuación, se observa una imagen que muestra de forma más clara en qué consiste dicho modelo.

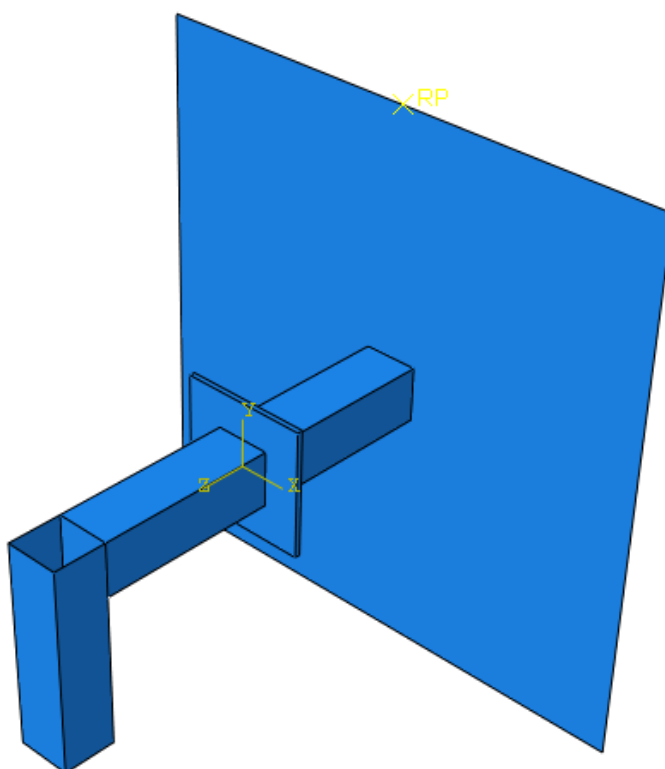
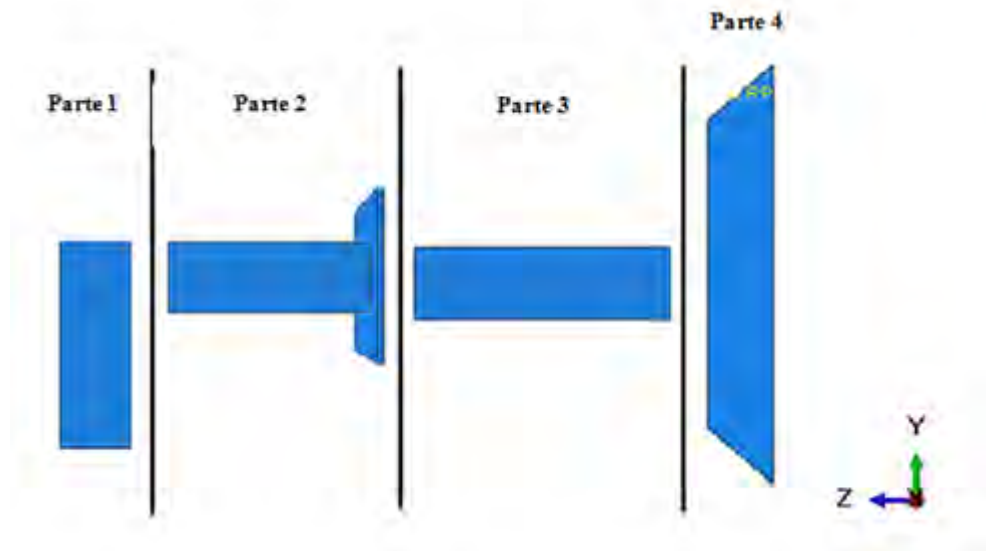


Figura 44. Vista isométrica de un modelo de ensayo

El modelo completo se puede subdividir a su vez en cuatro partes diferenciadas que son :



**Figura 45. Definición de las partes del modelo**

- *Parte 1*: se corresponde con la zona del “bastidor” de la topera. Su longitud determina la altura a la que se produce el impacto. Su forma geométrica puede variar en función de los resultados obtenidos. Debe ser lo suficientemente rígida para permitir la deformación del elemento de absorción de energía.
- *Parte 2*: corresponde al elemento de absorción de energía propio de la topera. Se varía su geometría y el espesor hasta alcanzar un nivel óptimo de deformación y unas deceleraciones pequeñas.
- *Parte 3*: es el elemento de absorción de energía que lleva el ferrocarril en la parte delantera. Al igual que la parte 2, se puede variar tanto su geometría como su espesor para obtener una eficiencia en la disipación de energía.
- *Parte 4*: Se trata de un cuerpo rígido e indeformable que simula un tren en movimiento.

### 3.5 Características geométricas y condiciones de contorno

Para que Abaqus pueda simular el impacto de forma verídica se necesita establecer un modelo geométrico y las condiciones de contorno que se aplican a este modelo.

Las condiciones de diseño que se deben seguir en cuanto a la geometría del modelo son limitantes en las partes 1, 2 y 3. La zona del elemento vertical (parte 1) es la que determina la altura del impacto entre el tren y la topera. Esta altura, que coincide con el punto medio de contacto entre la parte 2 y 3, es una condición de partida impuesta por el problema y su valor es igual a 1 metro. Por otra lado, la parte número 2 y 3 no tienen un valor límite en cuanto a su longitud, sin embargo el problema define que la máxima deformación admisible posterior al impacto no debe superar un área frontal máxima igual a 2.5 metros de ancho por 2 metros de alto.

Otro parámetro geométrico a tener en cuenta es la separación que existe entre la topera y el elemento que absorbe energía que lleva el tren. Esta distancia presenta valores pequeños (variables entre 1- 5 cm) para que el impacto entre ambas partes se produzca en un tiempo muy pequeño, de modo que se reduce el tiempo de simulación necesario para comprobar que el tren se detiene.

Por otra parte, las condiciones de contorno que se deben imponer son:

- Empotramiento en la zona inferior del elemento vertical que pertenece a la parte número 1. Este restringe tanto el movimiento como el giro de todos los ejes.
- Velocidad del tren y del elemento de absorción de energía que lleva en su parte delantera. La velocidad es uniforme e igual a 15m/s.
- Restricción del movimiento del tren. Puede desplazarse únicamente en la dirección del eje Z.
- Masa del tren. La masa del tren se considera fija y tiene un valor igual a 1000 kg.

### 3.6 Elementos tipo *Shell*.

Los elementos tipo *Shell*, son elementos estructurales planos cuyo espesor es mucho menor que sus otras dos dimensiones. Además tienen cinco o seis grados de libertad (tres de traslación y dos o tres de giro) en función del tipo de elemento.

Estos son la base de todas las simulaciones de resistencia a impacto. Se utilizan porque son bilinealmente interpolables y, por lo tanto, presentan el orden más bajo de interpolación de las funciones disponibles [11]. Como se expuso anteriormente, el uso de funciones de bajo orden de interpolación es la principal razón de su eficiencia computacional que se traduce en un menor tiempo de simulación.

Para el diseño del modelo, todos los elementos que se emplean son de tipo *Shell*. Sin embargo, hay que hacer una distinción entre el tren y el resto de elementos que componen el modelo. El tren se representa como una placa plana rígida que se considera indeformable mientras que el resto de elementos que se diseñan son elementos tipo placa pero son deformables.

### 3.7 Uniones y Contactos entre piezas

Es importante definir las uniones que existen entre las diferentes “*parts*” que se crean. La unión entre el elemento que porta el tren (parte 3) y el propio tren es de tipo “*tie*” que simula una unión de tipo adhesiva entre ambos. Por otro lado la unión entre las partes 1 y 2 que forman la topera se ha realizado mediante la opción “*Merge*”, de modo que se une la geometría sin una unión adhesiva. De este modo quedan definidas todas las uniones existentes entre los diferentes elementos.

Por otra parte, para simular correctamente la interacción entre los diferentes elementos geométricos que componen el problema es necesario definir los contactos que se producen. Si no se definen correctamente en las zonas que no están unidas, las piezas serían atravesadas de modo que no se transmitirían los esfuerzos entre ellas.

En nuestro caso, la teoría utilizada es la de tipo “*Penalty*”. Por un lado existe un contacto entre los elementos que impactan y además un denominado auto-contacto entre

las superficies de los elementos que sufren grandes deformaciones. De este modo, se imposibilitan los fenómenos de perforación o penetración y se produce una correcta transmisión de los esfuerzos entre los elementos [11].

### 3.8 Material empleado

El material para realizar la simulación del comportamiento del modelo sometido a impacto es el aluminio 1100- H12.

Se trata de una aleación que ofrece unas características excelentes de mecanizado, moldeado y soldado, además de poseer una alta resistencia a la corrosión y una buena conductividad eléctrica [50].

Para definir el aluminio, la industria utiliza un sistema de dígitos para la designación de sus aleaciones de aluminio forjado. Estos son los siguientes [50]:

- Primer dígito: indica el grupo de aleación de acuerdo con los principales elementos de aleación. En este grupo, el contenido mínimo de aluminio es de 99% y no hay ningún elemento principal de aleación.
- Segundo dígito: indica modificaciones en los límites de impurezas. Si el segundo dígito es cero, no existe un control especial sobre las impurezas individuales; si no, indican el control especial de uno o más impurezas individuales (valores del 1 al 9 en función del control).
- Tercer y cuarto dígito: Los dos últimos dígitos indican el contenido específico mínimo de aluminio. Aunque el contenido total de aluminio mínimo es de 99%, el mínimo para ciertas categorías es superior al 99% y los dos últimos dígitos representan las centésimas de más del 99%.

Por otro lado el índice H12 indica lo siguiente:

- Letra y primer dígito (H1): Acritud solamente. Endurecimiento por deformación plástica en frío, hasta obtener la resistencia mecánica requerida, sin tratamiento térmico posterior (laminación).

- Segundo dígito (2): Estado 1/4 duro. La resistencia a tracción se encuentra aproximadamente en la mitad entre la del estado recocido y la del semiduro.

De este modo queda definido cuál es el material que se emplea, siendo ahora necesario exponer la ecuación constitutiva que rige su comportamiento.

### **3.8.1 Ecuación constitutiva.**

Una ecuación constitutiva describe el comportamiento macroscópico resultante de la constitución interna de un material. El uso de esta ecuación permite obtener la tensión a partir de la deformación, la velocidad de deformación, la temperatura y otras variables. Su complejidad depende de las hipótesis que se planteen, del tipo de material y de las condiciones de carga entre otras cosas.

#### **3.8.1.1 Modelo de endurecimiento de Johnson-Cook.**

En el presente proyecto, la ecuación constitutiva que gobierna el comportamiento del aluminio 1100-H12 es la relación constitutiva de Johnson-Cook. Esta relación constitutiva está presente en la mayor parte de los programas de elementos finitos debido a la sencillez de la ecuación constitutiva y a que se dispone de los valores de las constantes empleadas en las ecuaciones para una amplia variedad de materiales.

El modelo de Johnson-Cook es un modelo mecánico de material desarrollado especialmente para modelos metálicos implicados en condiciones de impacto. El modelo reproduce el comportamiento de materiales que están sujetos a grandes deformaciones, altas temperaturas y altas velocidades de deformación [51,52]. En él se establece la tensión equivalente de Von Mises mediante tres términos desacoplados. El primer término define la dependencia del endurecimiento por deformación, el segundo la sensibilidad de la deformación y el tercero la sensibilidad de la temperatura.



El término de fluencia se define como:

$$\sigma_Y(\epsilon_p, \dot{\epsilon}_p, T) = (A + B\epsilon_p^n) \cdot \left(1 + C L_n\left(\frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0}\right)\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{T-T_0}{T-T_{melt}}\right)^m\right)$$

Donde,

- A: Límite elástico a temperatura ambiente en condiciones de baja velocidad de deformación.
- B y n: parámetros que representan el efecto del endurecimiento por deformación.
- C: Sensibilidad a la velocidad de deformación.
- m: sensibilidad de la temperatura.
- $T_m$ : Temperatura de fusión del material.
- $T_0$ : Temperatura ambiente.
- $\dot{\epsilon}_p$ : velocidad de deformación.
- $\dot{\epsilon}_0$ : velocidad de deformación de referencia.
- $T_H$ : temperatura equivalente definida como  $T_H = \frac{T-T_0}{T-T_{melt}}$

### 3.8.1.2 Criterio de daño de Johnson-Cook

Para definir de forma real el comportamiento del material analizado es necesario definir un modelo de daño que se debe tener en cuenta en el análisis numérico y que complementa el modelo de plastificación explicado anteriormente [51,52].

En los fenómenos de impacto se emplean como criterios de rotura expresiones basadas en la acumulación de daño, el cual se mide en función de la deformación plástica equivalente o de la energía plástica. Estas expresiones deben tener en cuenta fenómenos tales como grandes deformaciones, altas velocidades de deformación, elevadas tensiones e importantes gradientes térmicos.

Este criterio se desarrolla mediante cinco constantes  $\omega_i$ , que se corresponden con las constantes dependientes del material y  $T_H$ , temperatura equivalente. La acumulación del daño progresivo en el material se define por el parámetro  $\omega$ , de modo que se produce el colapso del material cuando  $\omega$  alcanza un valor igual a la unidad. Este parámetro es adimensional y se expresa como:

$$\omega = \Sigma \left( \frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_p^f} \right)$$

Donde ,

- $\Delta \varepsilon_p$  es un incremento de la deformación plástica acumulada que sucede en un ciclo de integración.
- $\varepsilon_p^f$  es el nivel de deformación crítico.

La deformación de fallo crítica es función de la velocidad de deformación plástica, la temperatura y la tensión hidrostática y de Von Mises como se observa en la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_p^f(\dot{\varepsilon}_p, T, \Sigma, \bar{\sigma}) = \left[ d_1 + d_2 \exp \left( d_3 \frac{\Sigma}{\bar{\sigma}} \right) \right] \left( 1 + d_4 L_n \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \left( 1 + d_5 \left( \frac{T - T_0}{T - T_{melt}} \right) \right)$$

Donde,

- $\Sigma$  Tensión hidrostática.
- $\bar{\sigma}$  Tensión de Von Mises
- $d_1, d_2, d_3, d_4$  y  $d_5$  son constantes que dependen de las características del material

A continuación, se muestra la tabla en la cual se presentan los parámetros que se emplean para caracterizar al material siguiendo el modelo de endurecimiento y daño de Johnson-Cook [53] (Tabla 1).



<b><u>PROPIEDAD (UNIDADES)</u></b>	<b><u>VALOR</u></b>
Densidad $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	2700
Módulo de elasticidad E (Pa)	65,76 E9
Coefficiente de Poisson $\nu$	0.3
Límite elástico A (Pa)	148,36 E6
B (Pa)	345,51 E6
n	0,183
Velocidad de deformación de referencia $\dot{\epsilon}_0$ (s <sup>-1</sup> )	1
C	0,001
m	0,859
Temperatura de fusión $T_{melt}$ (K)	893
Temperatura de referencia $T_0$	293
Calor específico $c_p$ (J/kg/K)	920
Coefficiente de Taylor-Quinney	0,9
$d_1$	0,071
$d_2$	1,248
$d_3$	-1,142
$d_4$	0,0097
$d_5$	0,0

Tabla 1. Propiedades del aluminio 1100-H12

### **3.9 Mallado**

El proceso de mallado de los elementos es de gran importancia para la simulación del modelo. En el caso de estudio se emplea una malla estructurada con predominio de elementos cuadráticos, aunque también existen zonas dónde es imposible mallar de esta forma por lo que se emplea un mallado menos estructurado y en el que se presentarán formas geométricas diferentes. Además, es importante apuntar que el mallado del elemento que modeliza el tren carece de importancia al tratarse de un elemento rígido.

#### **3.9.1 Análisis de sensibilidad de la malla**

La resolución de un problema de este tipo requiere de la solución de muchos sistemas de ecuaciones. Cuanto más elevado es el número de nodos y elementos del problema mayor es este sistema de ecuaciones y, consecuentemente, el coste computacional (tiempo de ejecución y cantidad de memoria utilizada). Por otro lado, si la malla es poco fina (bajo número de nodos y elementos), las soluciones que se obtienen son de mala calidad.

Por esta razón, para comprobar que los resultados obtenidos a través Abaqus/Explicit son verídicos y se aproximan a la realidad se debe realizar un análisis de sensibilidad de la malla.

Este análisis consiste en variar el tamaño de la malla. Para cada mallado se obtienen una serie de resultados que deben ser comparados de modo que se pueda comprobar donde convergen dichos resultados. Cuando se consigue un tamaño de malla que se considera óptimo, no se debe seguir refinando la malla porque esto daría lugar a un gran aumento del coste computacional en relación con la pequeña mejora en la precisión de los resultados.

A continuación se muestra un análisis de malla que se ha realizado para uno de los modelos presentados en el proyecto.

	Malla1	Malla2	Malla 3	Malla 4	Malla 5	Malla 6
Número de elementos	2168	5557	12419	17345	22009	24476
Número de nodos	2252	5671	12566	17518	22192	24671

Tabla 2 Distintos tamaños de malla para un modelo analizado

### Análisis sensibilidad de la malla

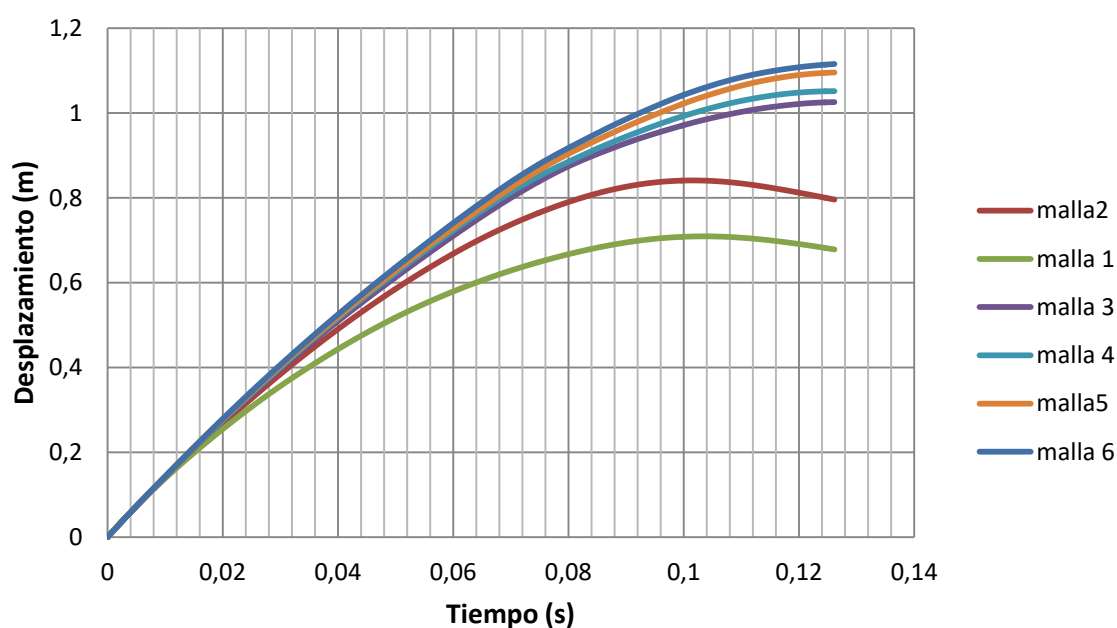


Figura 46. Desplazamiento en función del tiempo para análisis de sensibilidad de malla

La Figura 46 muestra las evidentes diferencias de los resultados obtenidos para un mismo modelo, entre una malla muy poco refinada (malla 1) y una muy fina (malla 6). Sin embargo, si comparamos los resultados para las mallas 5 y 6 son prácticamente idénticos. Ambas curvas convergen, cometiéndose un error relativo del 1,5%. Por tanto, se puede concluir que, a partir del tamaño de malla 5, un refinamiento



de la malla da lugar a unos resultados un más precisos pero el coste computacional que surge como consecuencia del refinamiento de malla es mucho mayor que la precisión de los resultados. Por este motivo, se dan como buenos los resultados obtenidos para la malla número 5.

Este análisis se debe realizar para cada uno de los modelos que se ha realizado de modo que pueda comprobarse la calidad de los resultados obtenidos.



## *Capítulo 4*

# *ANÁLISIS Y RESULTADOS*

## 4 Análisis y resultados

### 4.1 Introducción

En este apartado se expone el desarrollo del proceso de diseño del modelo más óptimo. Para ello, es necesario realizar un análisis de los resultados obtenidos para cada uno de los modelos, de modo que se puedan explicar las diferencias entre los distintos modelos y, por tanto, justificar las decisiones que se han tomado para mejorar una estructura inicial sencilla.

Para llevar a cabo una comparación entre los diferentes modelos, se van a presentar una serie de valores característicos en función del tiempo. El número de valores obtenidos para cada variable es suficientemente grande como para mostrar con precisión el suceso real. Además, estos valores se muestran en una serie de gráficas que permiten comprobar su evolución durante el proceso.

Los aspectos característicos que se van a estudiar para los elementos de deformación son:

- *Energía cinética, energía interna y energía de deformación plástica.* Estas gráficas permiten comprobar cómo se transforma la energía cinética en energía de deformación plástica principalmente.
- *Modo de deformación de la estructura.* De forma visual se puede comprobar qué zonas de la estructura se pliegan de forma óptima y cuáles no. Permite identificar zonas de concentración de tensiones y posibilita la mejora de la estructura.
- *Reacción de fuerzas y momentos flectores en el empotramiento.* Estas se analizarán en el modelo más óptimo, ya que no se usará para comparar entre los diferentes modelos.

Por otro lado, los parámetros característicos que se estudian para el tren, medidos todos en la dirección del eje Z, son:



- *Desaceleración.* Es el principal criterio de selección, ya que la deceleración es proporcional a la fuerza que reciben los pasajeros.
- *Velocidad.* Se debe demostrar que la estructura es capaz de detener al tren por completo.
- *Desplazamiento.* Muestra la evolución de la longitud recorrida por el tren durante el impacto.

## 4.2 Modelo 1

El modelo 1 es el que sirve de base para la optimización estructural del sistema completo. Con este modelo se pretende obtener una visión de cómo deben ser los elementos en lo que a robustez se refiere. Es decir, se emplea para demostrar la importancia que tiene la elección del espesor en cada una de las partes para posibilitar un plegado óptimo, y a partir de las conclusiones extraídas de él, poder continuar con el proceso de mejora.

Este modelo está compuesto por una topera que consta de tres elementos y un elemento de absorción de energía que va unido al tren.

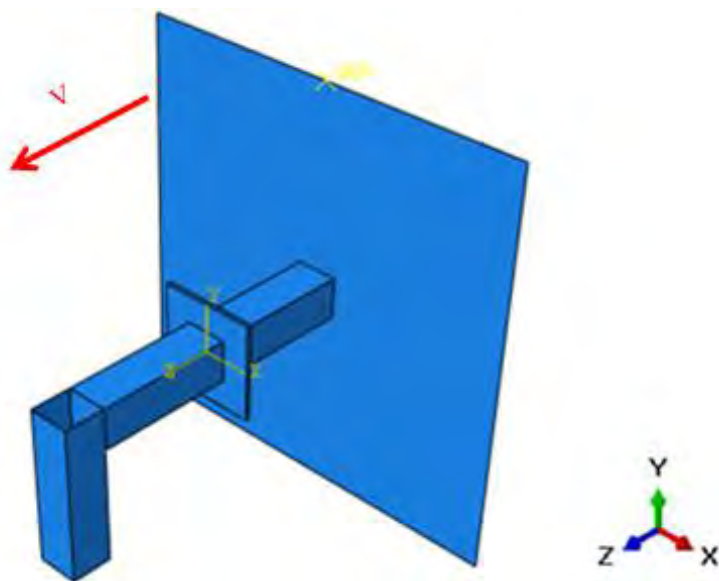
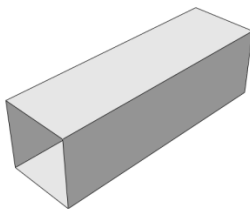
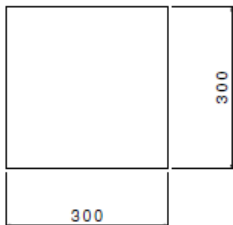
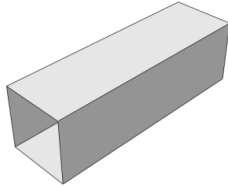
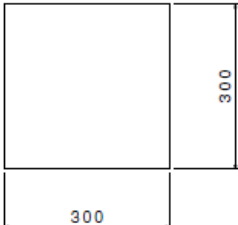
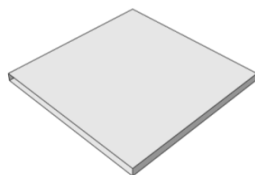
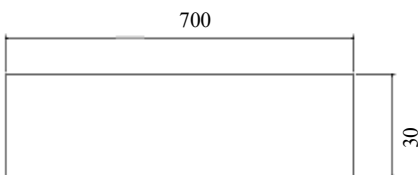
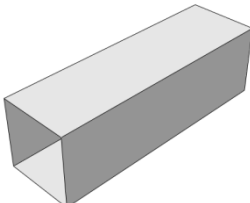
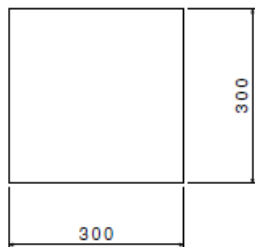
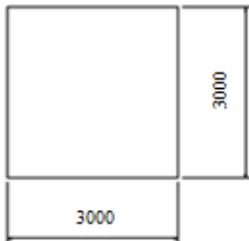


Figura 47 Vista en isométrico del modelo 1

Como ya se definió anteriormente (Véase 3.3), el sistema se puede subdividir en diferentes partes. A continuación se establecen las medidas de cada uno de los elementos que forman cada parte del sistema.

PARTE	LONGITUD	SECCIÓN
1-Correspondiente con el tubo vertical	 $L = 1.15 \text{ m}$	
2- Elemento que absorbe energía en topera	 $L = 1 \text{ m}$	
2- Placa	 $L = 0.7 \text{ m}$	
3 - Elemento que absorbe energía del tren	 $L = 1 \text{ m}$	

<p><b>4—Tren</b></p> <p>(Este elemento tendrá las mismas dimensiones en todos los modelos analizados)</p>	<p>-</p>	
---	----------	---

**Tabla 3. Definición dimensiones de los elementos del modelo 1**

Una vez definidas las dimensiones, falta por definir el espesor de cada uno de los elementos. En función del espesor se van a simular tres modelos con esta misma configuración.

#### 4.2.1 Modelo 1.a

El modelo 1.a está formado por elementos que presentan el mismo espesor (Tabla 4).

	Parte 1	Parte 2- Tubo horizontal	Parte 2- Placa	Parte 3
Espesor (mm)	4	4	4	4

**Tabla 4. Definición de espesores modelo 1.a**

El valor mínimo del espesor que se puede seleccionar para cualquier elemento es de 1mm. Esto es válido para todos los modelos analizados durante el proyecto.

##### 4.2.1.1 Simulación

Una vez definidos los espesores se procede a mostrar los resultados de la simulación. Para ello, se genera una tabla con dos tiras de imágenes que muestran el proceso de impacto en función del tiempo. Además, las imágenes de las deformaciones

de la estructura van acompañadas de una leyenda en la que se observa el valor de la tensión de Von Mises.

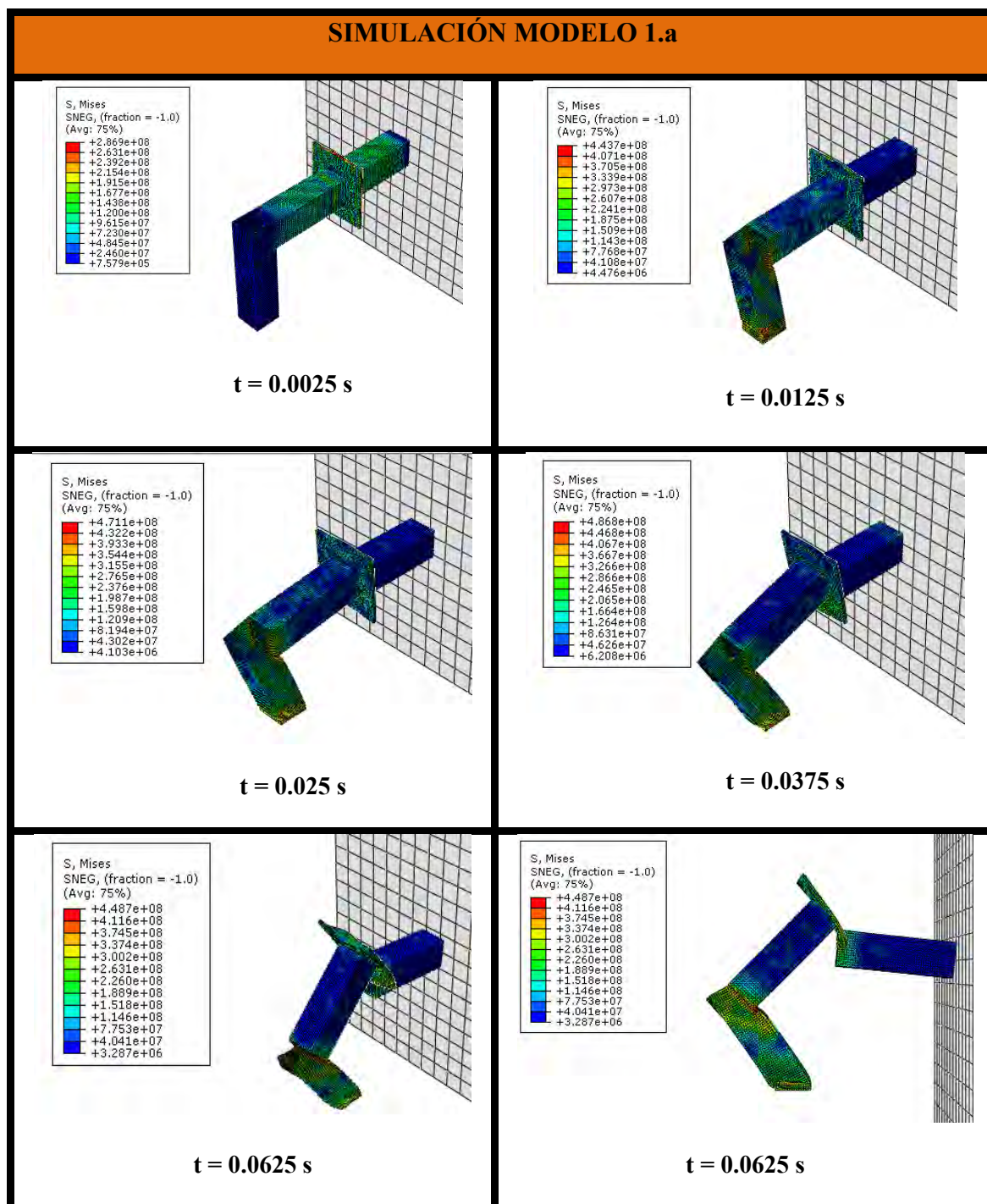


Figura 48. Proceso de deformación del modelo 1.a en función del tiempo

#### 4.2.1.2 Conclusiones

Como se puede comprobar en la Figura 48, tras el impacto del tren sobre la topera, la estructura colapsa. Cuando se produce el impacto, al presentar todos los elementos el mismo espesor, no existe ninguna zona que posibilite la compresión de los elementos de absorción de energía (parte 2 y 3) y, por lo tanto, no se produce el plegado que se requiere para llevar a cabo la disipación energética necesaria para la detención del tren.

Además se puede observar que, dado que la fuerza de impacto es perpendicular al elemento que está empotrado en el suelo, se produce un momento flector que produce un giro antihorario del elemento vertical.

Este caso muestra la importancia en la selección de los espesores de cada uno de los elementos del sistema, de modo que una mala elección de estos, produce el colapso de la estructura.

#### 4.2.2 Modelo 1.b

Debido a que el modelo anterior no ha logrado detener el tren y la estructura ha colapsado, se deben modificar los espesores en alguna de las zonas. A priori, un cambio que resulta necesario realizar es en el espesor del tubo vertical (Parte 1). Este elemento debe actuar de forma rígida, de modo que posibilite la deformación del elemento que lleva la topera diseñado para tal función. Para ello, debe aumentarse el espesor en este elemento, de modo que sea más robusto que el resto.

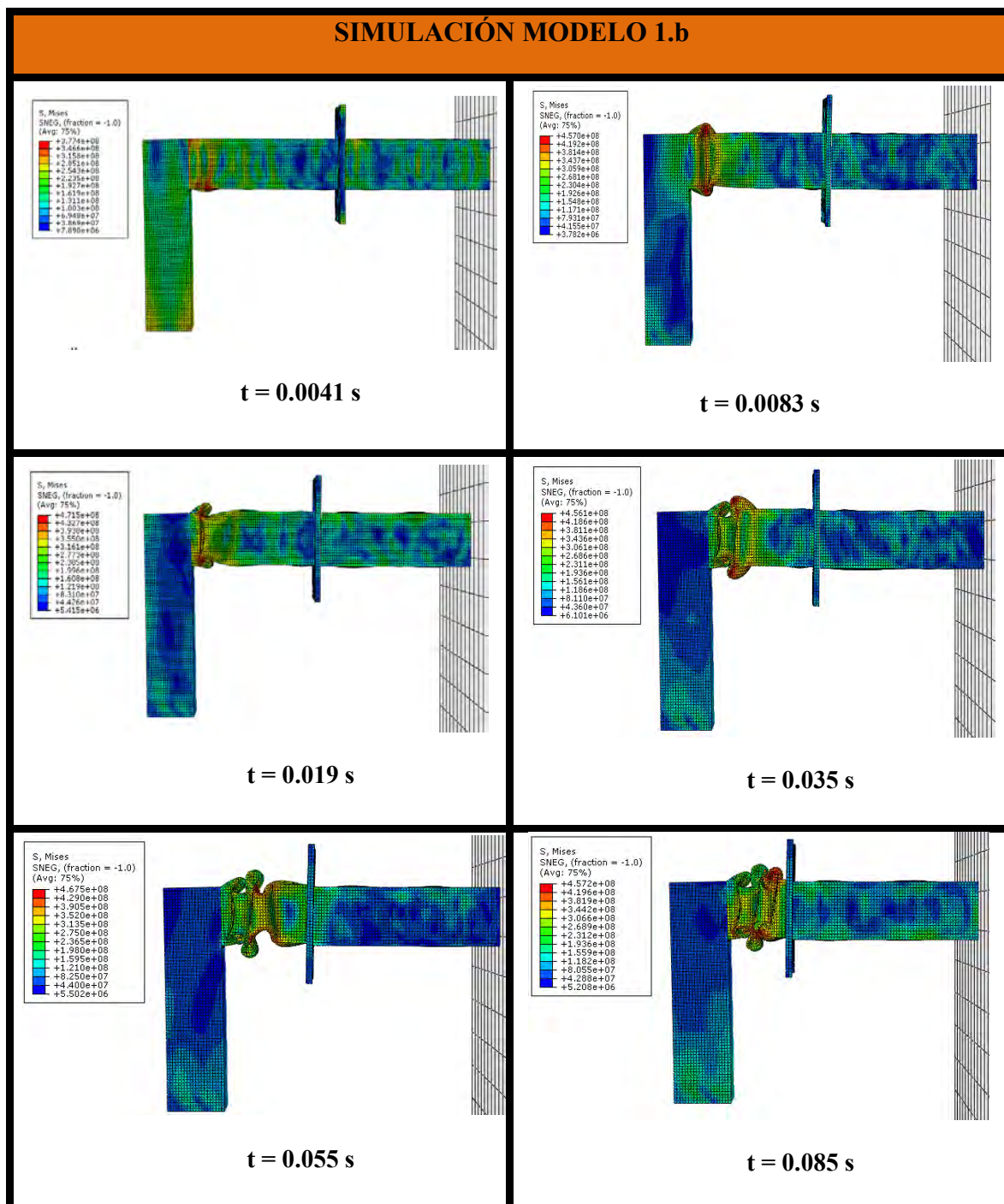
A continuación se muestra una tabla con los espesores de cada uno de los elementos:

	Parte 1	Parte 2- Tubo horizontal	Parte 2- Placa	Parte 3
Espesor (mm)	9	4	9	4

Tabla 5 Definición de espesores modelo 1.b

### 4.2.2.1 Simulación

Una vez definidos los espesores se procede a mostrar los resultados de la simulación.





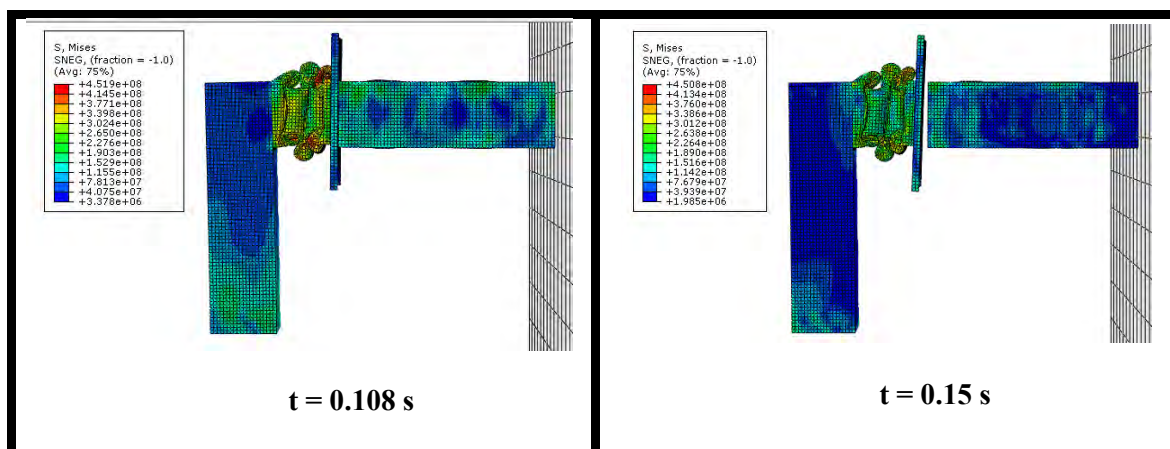


Figura 49. Proceso de deformación del modelo 1.b en función del tiempo

#### 4.2.2.2 Parámetros característicos

A la vista de la simulación y teniendo en cuenta las tensiones de los elementos, se puede comprobar que el tren se ha detenido. Por este motivo, a continuación, se muestran aquellos parámetros más importantes del proceso.

##### ➤ Aceleración

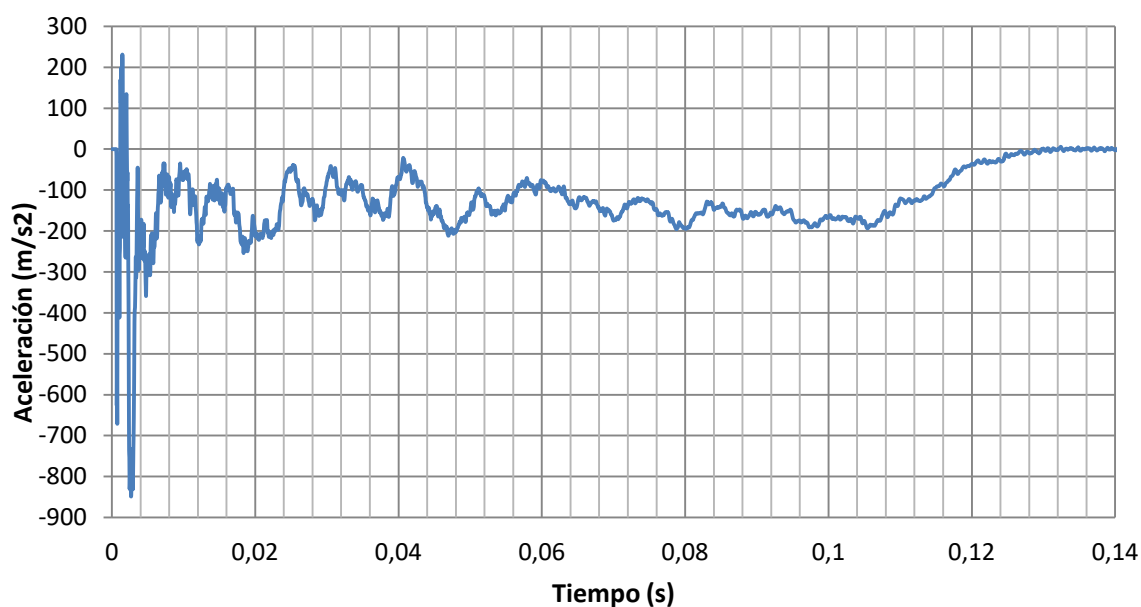


Figura 50. Evolución de la aceleración del tren durante el impacto (modelo 1.b).



La Figura 50 muestra la deceleración que sufre el tren a consecuencia del impacto. Como se puede comprobar en el inicio del proceso aparecen dos picos de aceleración elevados que son consecuencia de la condición de contacto y el primer pliegue que tiene lugar en el instante que se produce el choque. La deceleración máxima del impacto alcanza un valor de  $-850 \text{ m/s}^2$ . A medida que evoluciona el proceso, estos picos se reducen, alcanzando la deceleración un valor promedio, entre el inicio del impacto y la detención del tren, de  $-144 \text{ m/s}^2$ .

Cada uno de los picos que presenta la gráfica se corresponde con los pliegues que sufren los elementos de absorción de energía. El inicio del proceso de formación de pliegues coincide con los picos inferiores (deceleración máxima) y se desarrolla durante el recorrido entre el pico superior y el inferior. Por lo tanto, las variaciones entre un punto mínimo y su mínimo consecutivo de aceleración muestran cada uno de los plegados que se originan en la estructura.

➤ Velocidad

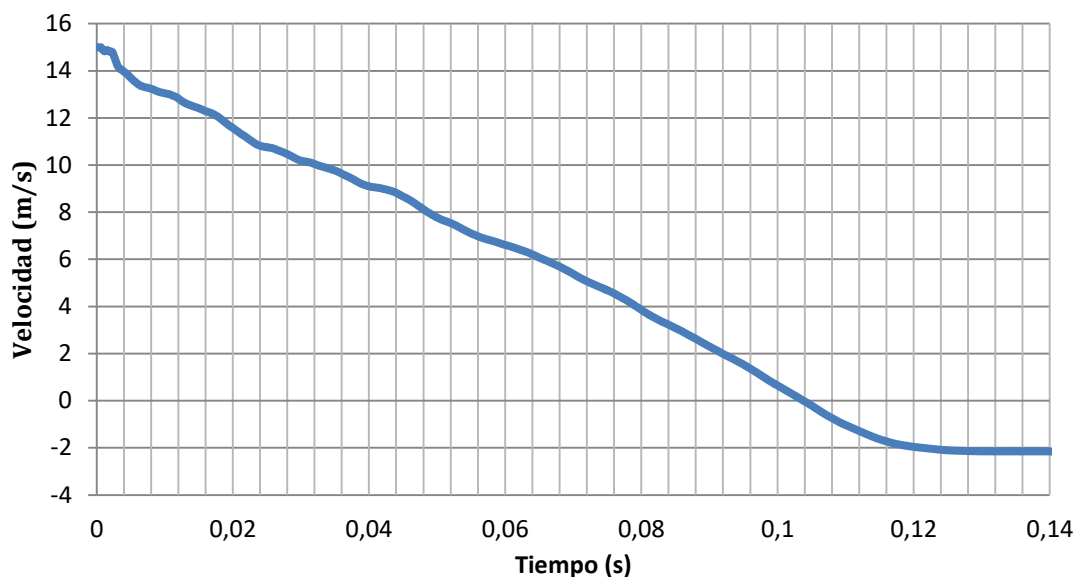


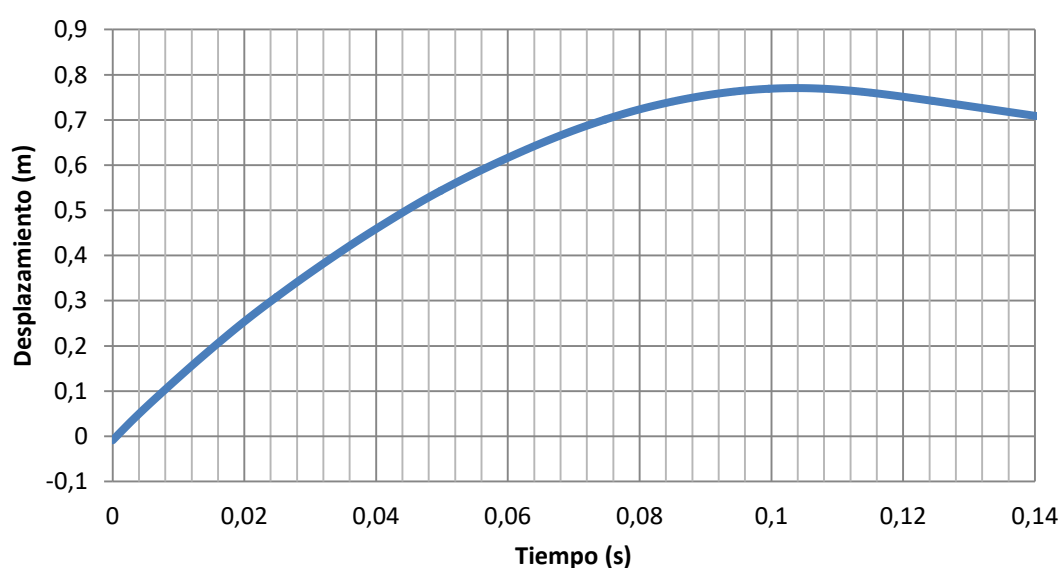
Figura 51. Velocidad en función del tiempo (modelo 1.b).

Como se puede observar en la Figura 51, en el inicio la velocidad del tren es constante hasta que se produce el impacto. Cuando este tiene lugar, la velocidad se va

reduciendo paulatinamente, siendo esta reducción mayor cuando la deceleración producida por los pliegues de la estructura es más grande. Finalmente, se comprueba que en el instante 0,1s el tren se ha detenido.

Posterior a la detención del tren, la velocidad adquiere valores negativos. Estos son consecuencia de la energía elástica que almacena el sistema. Esta energía que posee la estructura, se devuelve sobre el tren, de modo que lo hace retroceder.

➤ Desplazamiento



**Figura 52. Desplazamiento del tren durante el impacto (modelo 1.b).**

La Figura 52 muestra cómo evoluciona el desplazamiento del tren en función del tiempo. Este se inicia con un valor negativo, puesto que se considera como punto de partida (desplazamiento = 0 m) el instante en el que se produce el contacto entre ambas partes. Se observa como el desplazamiento aumenta hasta alcanzar un valor máximo de 0,77 m en el instante en el que se detiene el tren. Posteriormente, se observa como el tren retrocede como consecuencia de la energía elástica que almacena el sistema.

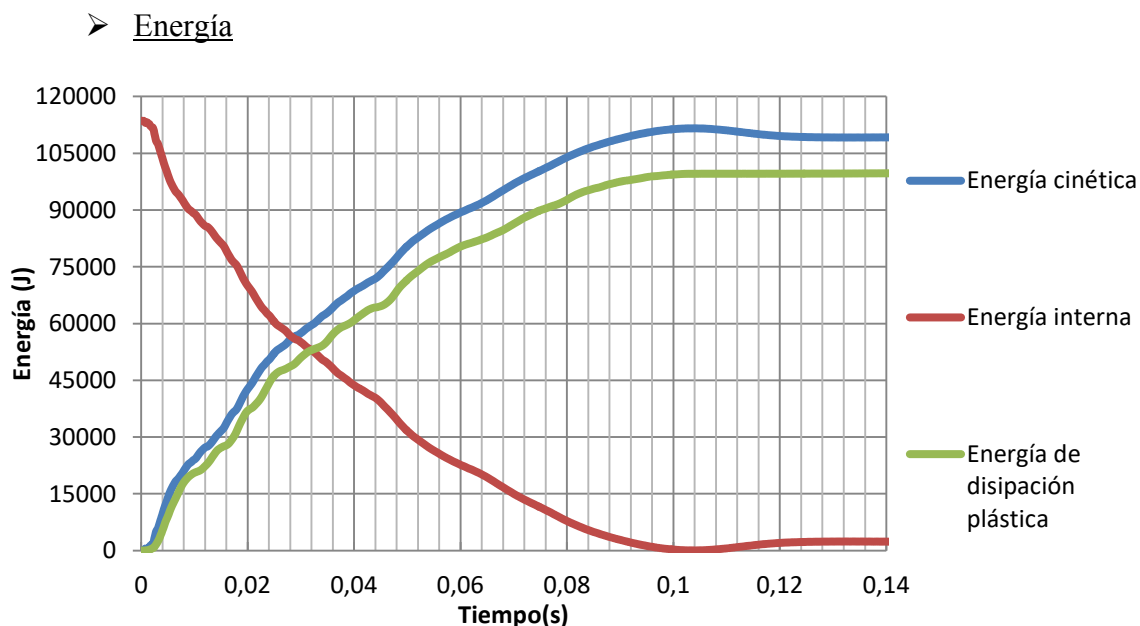


Figura 53. Energía del sistema en función del tiempo (modelo 1.b).

La energía cinética inicial del sistema está definida por la masa y la velocidad del elemento que impacta. Dado que la masa del elemento de absorción de energía que lleva el tren en su parte delantera es distinta en función del modelo que se analiza, el valor de la energía cinética no es constante en todos los modelos. Sin embargo, ésta es similar puesto que la masa de dicho elemento es pequeña en comparación con la masa del tren. Además, como se puede observar en la Figura 53, la energía cinética y la energía interna del sistema son inversamente proporcionales.

El parámetro más importante, en cuanto a energía se refiere, es la energía disipada por deformación plástica. Esta muestra la cantidad de energía cinética que ha transformado el sistema como consecuencia de la deformación permanente de sus elementos. La energía de disipación plástica tiene un valor máximo de 99.715 J. Teniendo en cuenta que la energía cinética inicial para este modelo es de 113.593 J, se puede comprobar que la mayor parte de la energía cinética se ha transformado en energía de plegado que posibilita la detención del tren. La diferencia entre los valores de energía de deformación plástica y energía interna son debidos a la componente elástica del material.

#### 4.2.2.3 Conclusiones

La geometría y la elección de los espesores muestran que esta estructura es capaz de detener el tren. Sin embargo, se puede comprobar que únicamente actúa la topera, ya que el elemento de absorción de energía que lleva el tren no se deforma.

Por lo tanto, se puede concluir que es necesario que el espesor del elemento de absorción que lleva el tren debe ser menor que el espesor del elemento de absorción de la topera, de modo que, en primer lugar, se produzca la deformación de este elemento y, posteriormente, la deformación de la topera. Así se posibilita la reducción de los espesores de ambos elementos y, en consecuencia, la reducción en los valores de la deceleración.

#### 4.2.3 Modelo 1.c

Este modelo surge como consecuencia de las conclusiones obtenidas en el anterior modelo. A continuación se muestran los nuevos espesores seleccionados para cada una de las partes.

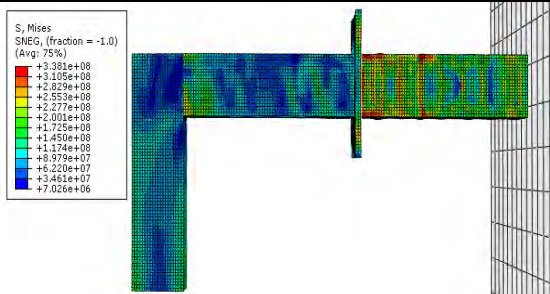
	Parte 1	Parte 2- Tubo horizontal	Parte 2- Placa	Parte 3
Espesor (mm)	9	3	9	2

Tabla 6 Definición de espesores modelo 1.c

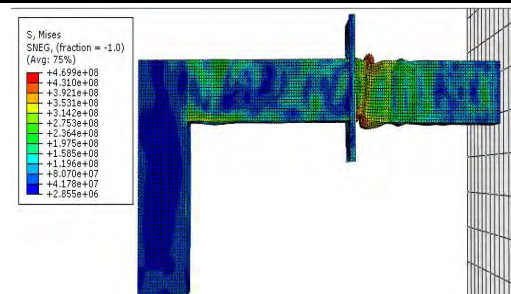
##### 4.2.3.1 Simulación

A continuación, se procede a mostrar los resultados de la simulación.

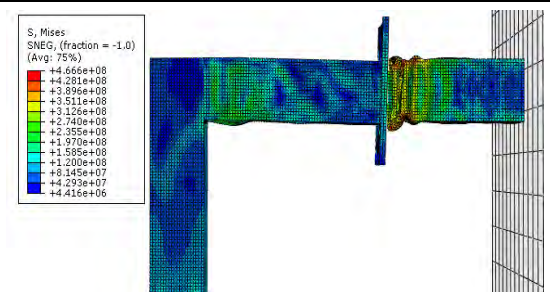
### SIMULACIÓN MODELO 1.b



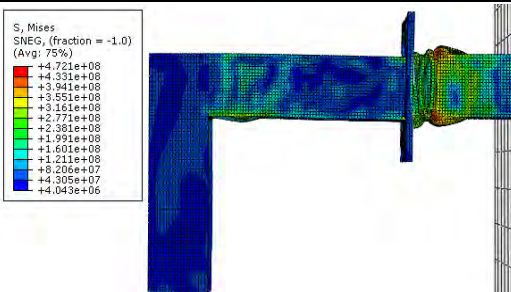
$t = 0.0031 \text{ s}$



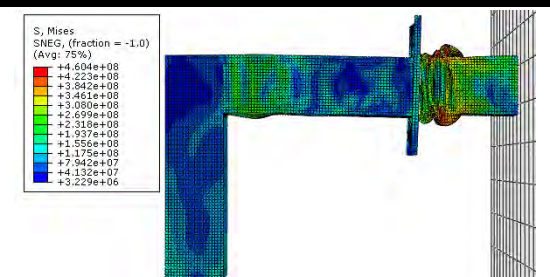
$t = 0.0095 \text{ s}$



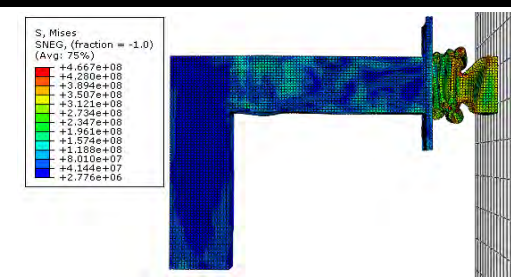
$t = 0.020 \text{ s}$



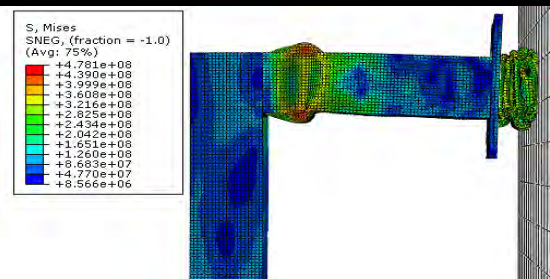
$t = 0.035 \text{ s}$



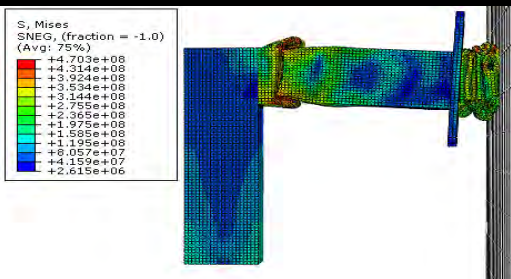
$t = 0.041 \text{ s}$



$t = 0.056 \text{ s}$



$t = 0.081 \text{ s}$



$t = 0.11 \text{ s}$

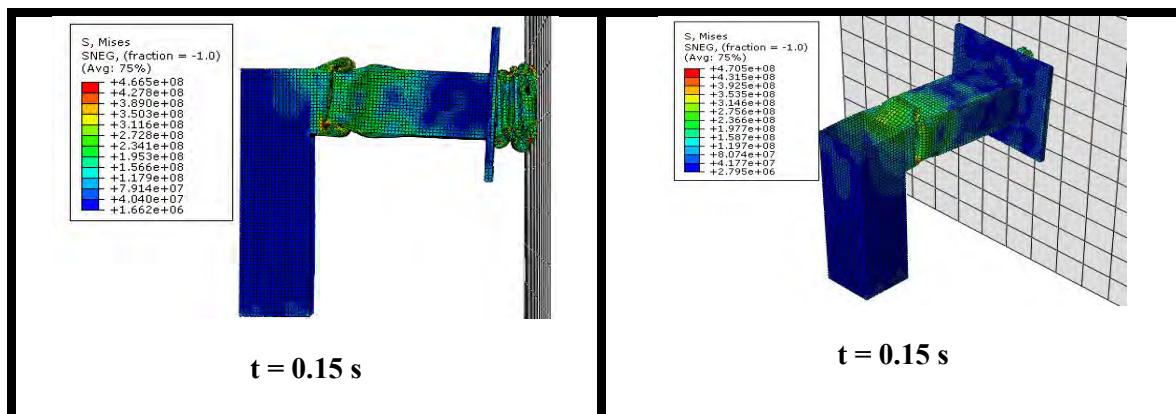


Figura 54. Proceso de deformación del modelo 1.c en función del tiempo

#### 4.2.3.2 Parámetros característicos

A continuación se muestran aquellos parámetros más importantes del proceso.

##### ➤ Aceleración

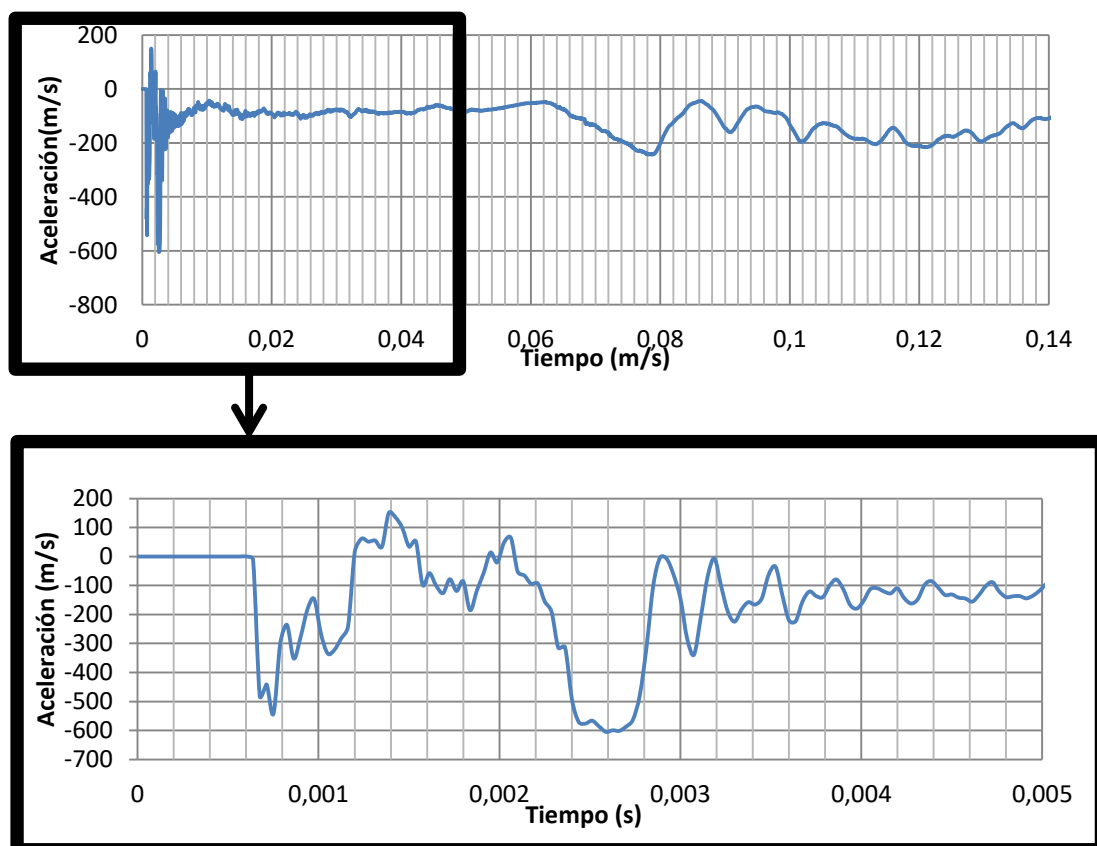


Figura 55. Aceleración global y aceleración en el instante inicial para el modelo 1.c

En la Figura 55 se pueden observar los picos de deceleración que tienen lugar como consecuencia del impacto. De nuevo, en el instante inicial, se producen dos picos de aceleración que se pueden observar con más claridad en el zoom realizado de la gráfica de la aceleración. Sin embargo, al reducir los espesores respecto del anterior modelo se comprueba que los valores de estos dos picos se han reducido, adquiriendo un valor máximo de  $-605 \text{ m/s}^2$ .

Además, resulta característico otro pico que se produce en el instante  $0.078 \text{ s}$ , el cual se corresponde con el comienzo de plegado del elemento de absorción de energía de la topera.

➤ Velocidad

Al igual que el anterior modelo, en los instantes iniciales la velocidad del tren es constante hasta que se produce el impacto. Posteriormente, la velocidad se va reduciendo paulatinamente, siendo esta reducción mayor cuando la deceleración producida por los pliegues de la estructura es más grande. Finalmente se comprueba que en el instante  $0,128 \text{ s}$  el tren se ha detenido y que posteriormente la velocidad adquiere valores negativos como consecuencia de la energía elástica que almacena la estructura.

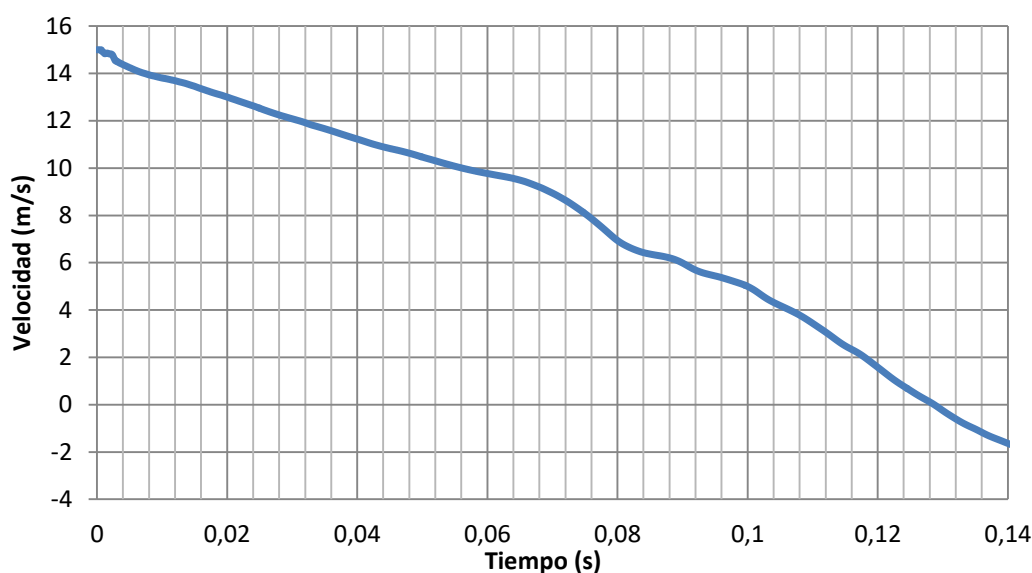
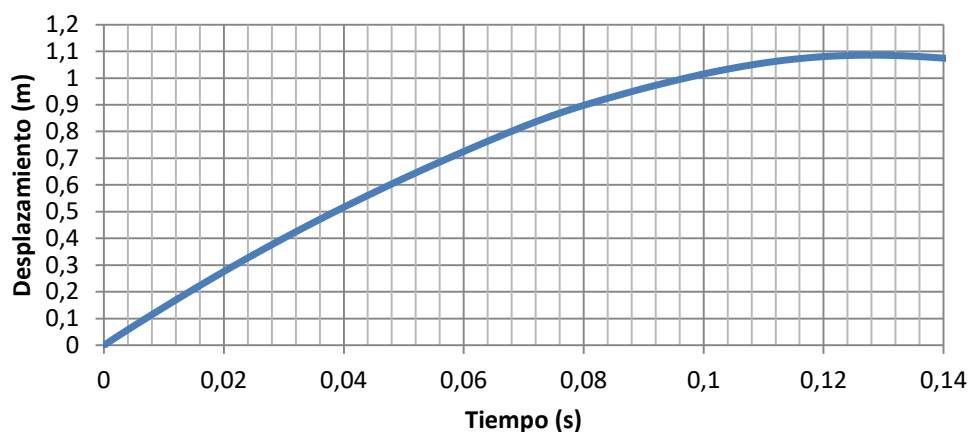


Figura 56. Velocidad en función del tiempo (modelo 1.c).

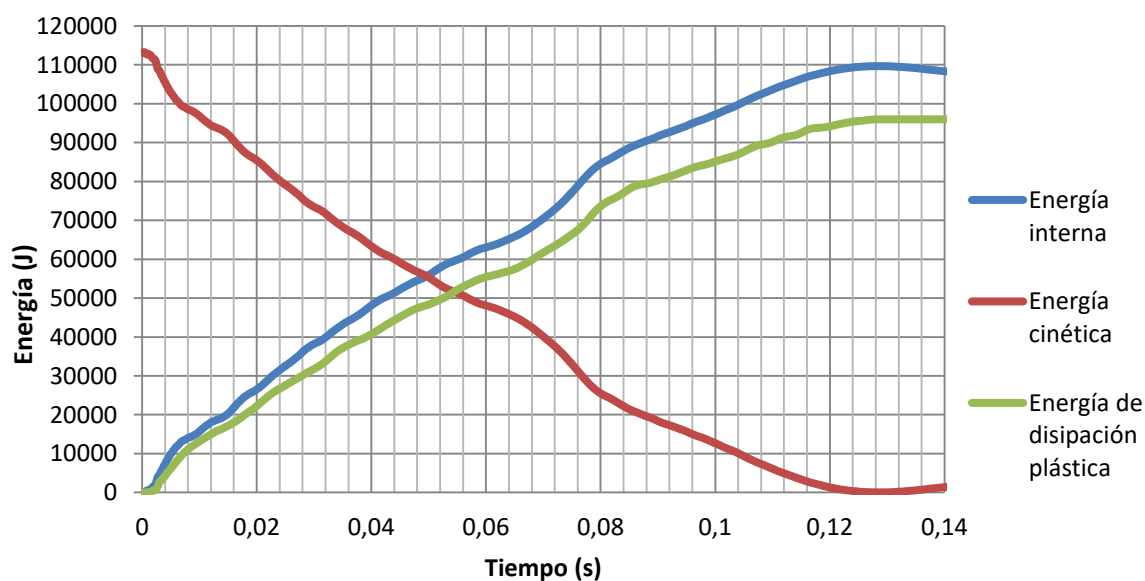


➤ Desplazamiento**Figura 57. Desplazamiento del tren durante el impacto (modelo 1.c).**

La Figura 57 muestra el desplazamiento del tren. Este crece de forma constante hasta que alcanza un valor máximo de 1,08m y, posteriormente, el tren retrocede.

➤ Energía

La Figura 58 muestra el comportamiento esperado en cuanto a energía. La energía cinética inicial en este caso presenta un valor de 113229 J y la energía que se consigue disipar mediante deformación plástica tiene un valor de 96006 J.

**Figura 58. Energía del sistema en función del tiempo (modelo 1.c)**

### 4.2.3.3 Conclusiones

Se consigue deformar el elemento que va situado en el tren en primer lugar y, posteriormente, la topera. De este modo, se emplean ambos elementos para la absorción de energía del impacto, posibilitando la reducción del valor de la deceleración como se puede ver en la Figura 55.

Esta condición en la relación de espesores se utilizará en los siguientes modelos analizados.

## 4.3 Modelo 2

En el modelo 2 se prueban diferentes configuraciones para la parte 1, correspondiente a los elementos verticales situados en la topera. Estos deben ser suficientemente robustos como para posibilitar el plegado secuencial del elemento situado sobre el eje longitudinal de impacto. Para ello, se comprobarán dos modelos nuevos como los que se muestran en la Figura 59.

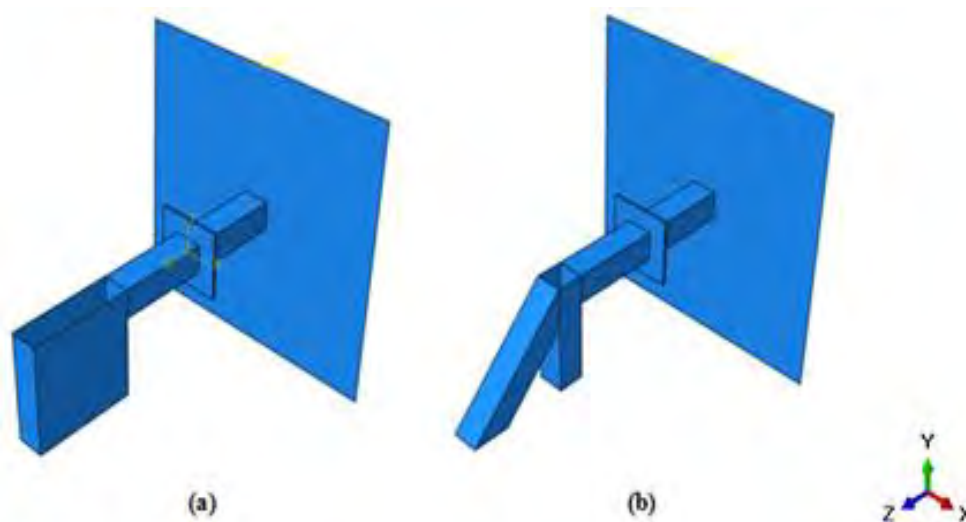
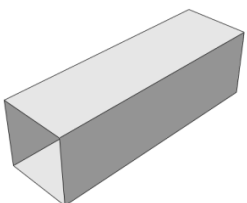
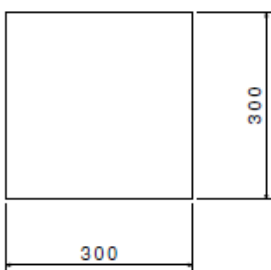
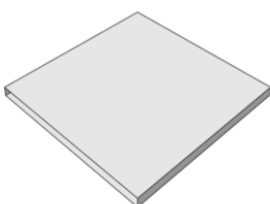
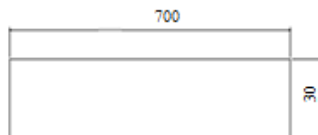
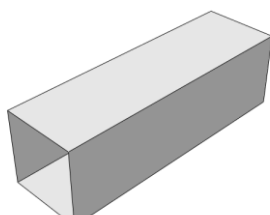
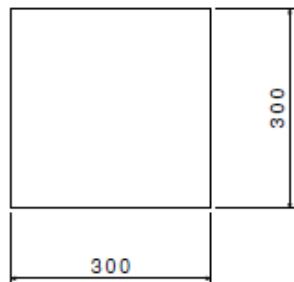
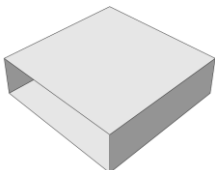
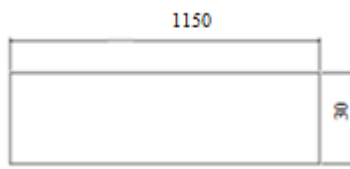


Figura 59. Vista isométrica diferentes configuraciones (a y b) para el modelo 2

Ambos modelos comparten geometría en todos los elementos del sistema, exceptuando la zona de la topera que se modifica en este modelo. Por ello, se adjunta

una tabla con la geometría de ambos modelos, indicando aquellas zonas que son diferentes.

A continuación se establecen las medidas de cada uno de los elementos que forman cada parte del sistema.

	PARTE	LONGITUD	SECCIÓN	ESPESOR
Elementos comunes para los dos modelos	2- Elemento que absorbe energía en topera	 $L = 1 \text{ m}$		3mm
	2- Placa	 $L = 0.7 \text{ m}$		9mm
	3 – Elemento que absorbe energía del tren	 $L = 1 \text{ m}$		2mm
Modelo 2.a	1- Elemento que está empotrado en el suelo	 $L = 1,15 \text{ m}$		9mm

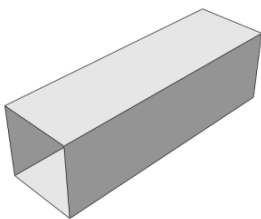
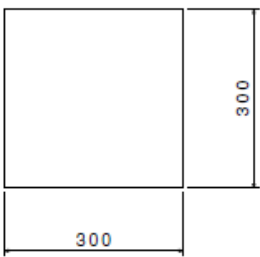
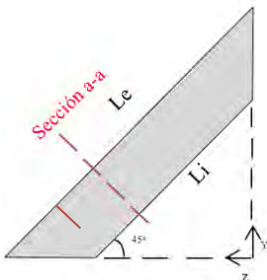
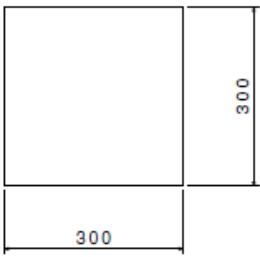
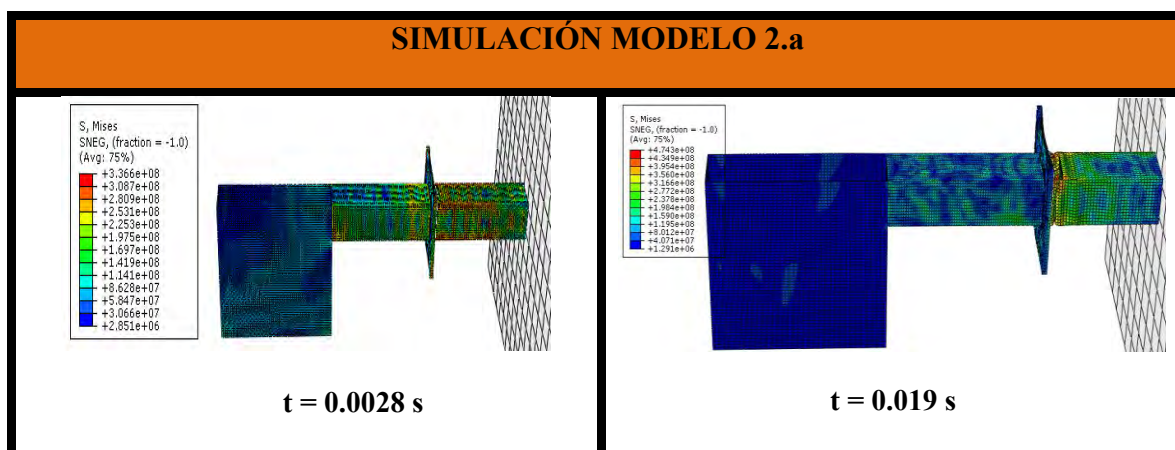
Modelo 2.b	1-Tubo vertical	 $L = 1.15 \text{ m}$		9mm
	1- Elemento inclinado	 $Le = \frac{23\sqrt{2}}{20} \text{ m}$	Sección a-a 	9mm

Tabla 7. Definición dimensiones de los elementos del modelo 2

### 4.3.1 Simulación

A continuación se procede a mostrar las simulaciones para los casos a y b.



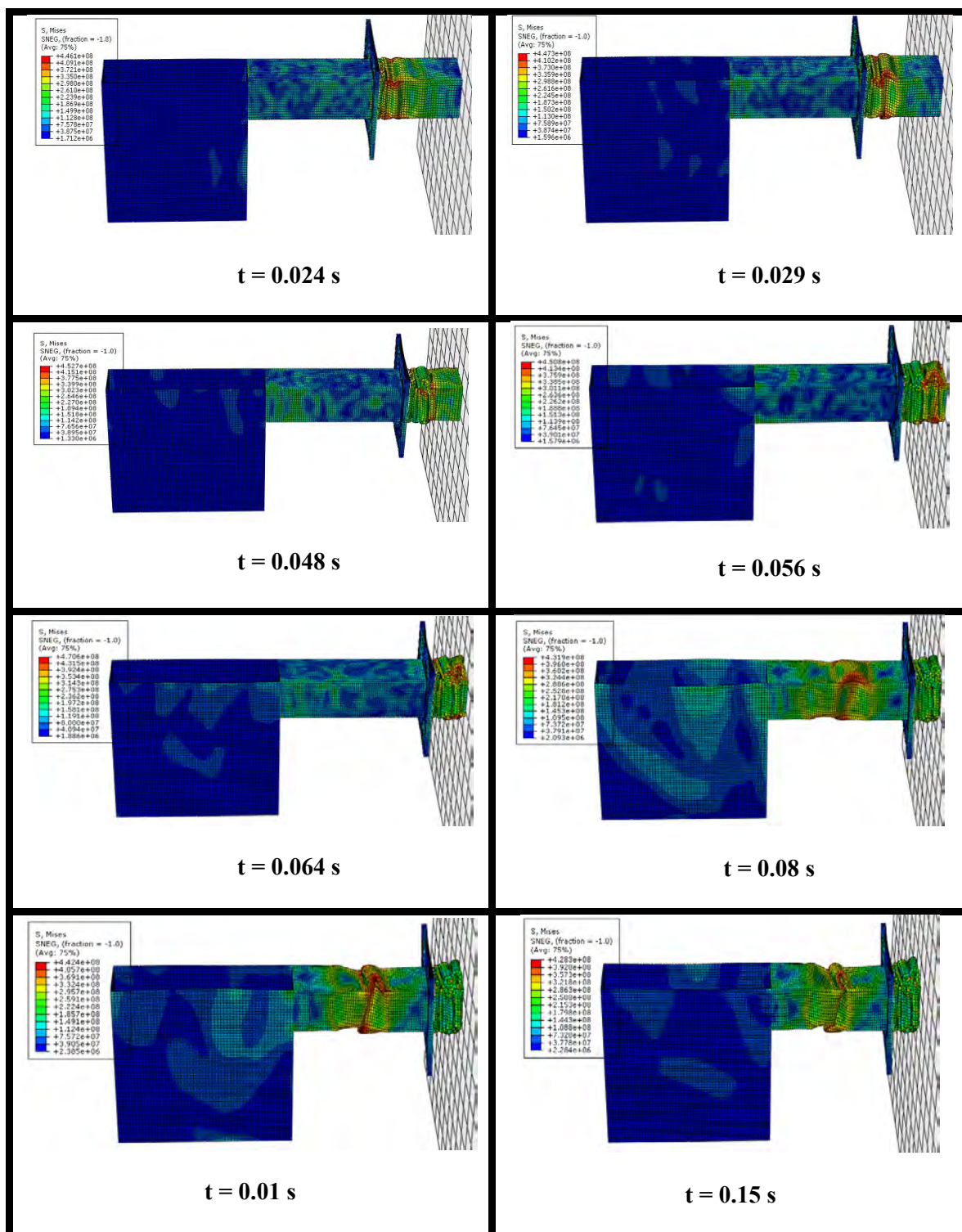


Figura 60. Proceso de deformación del modelo 2.a en función del tiempo



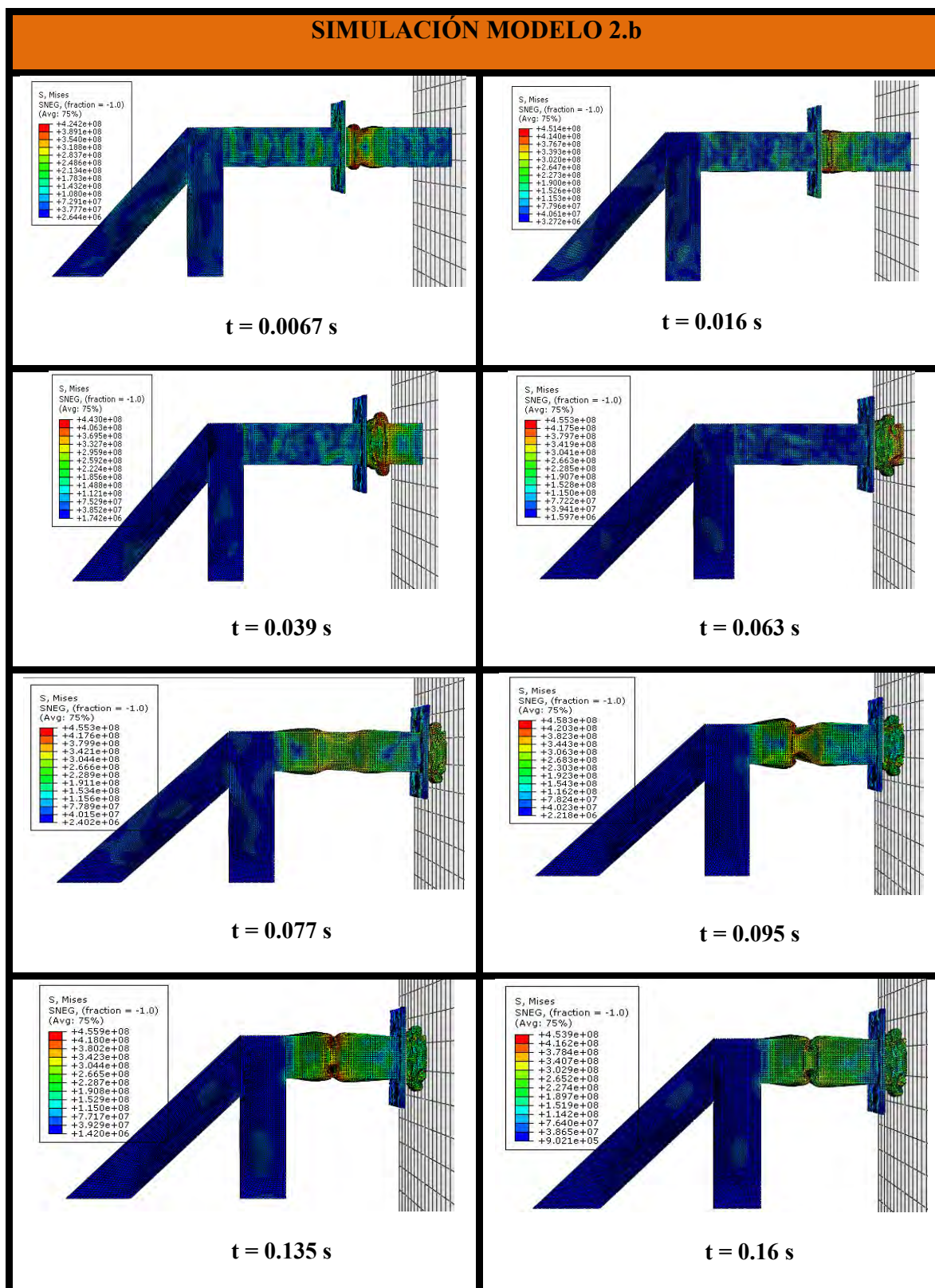


Figura 61. Proceso de deformación del modelo 2.b en función del tiempo

### 4.3.2 Parámetros característicos

En esta ocasión se muestran los parámetros de ambos casos en la misma gráfica, de modo que se pueda realizar una comparativa entre ambos.

➤ Aceleración

Como se puede ver en la Figura 62 los valores de la aceleración son muy parecidos para los dos modelos. Ambos siguen mostrando dos picos iniciales y un pico de deceleración elevado ( $t \approx 0,08s$ ) con respecto al resto que se corresponde con el inicio del pliegue del elemento de la topera. Los pliegues que se producen entre ambos muestran valores muy similares, sin ningún valor especialmente elevado.

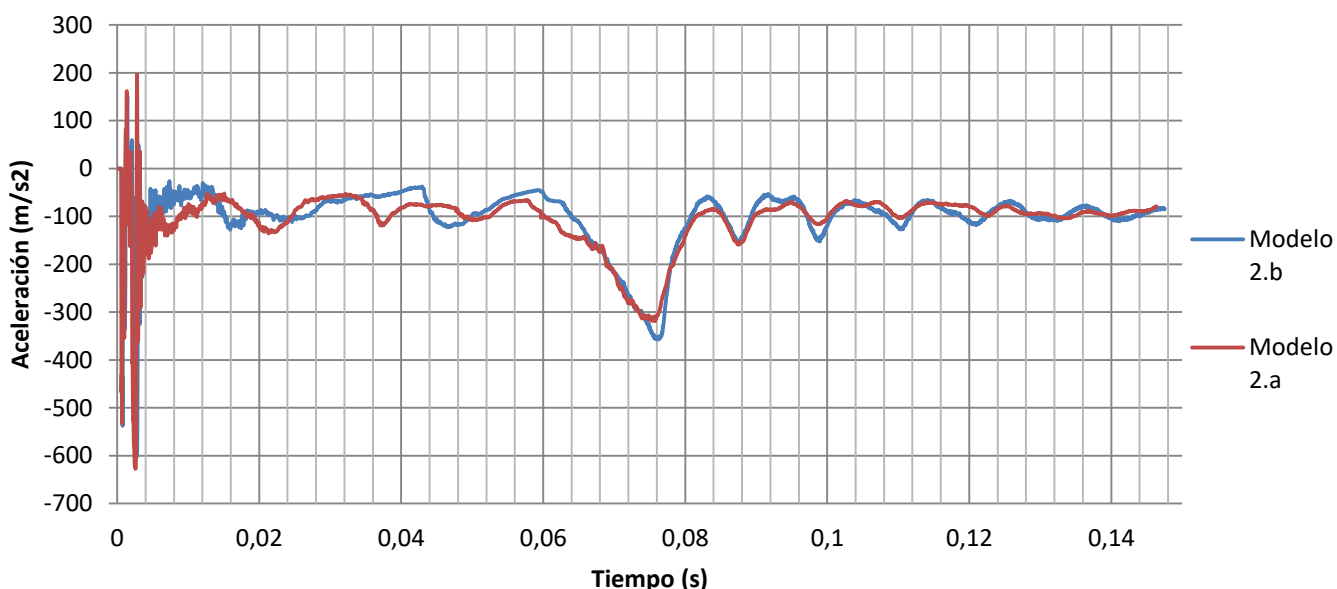


Figura 62. Evolución de la aceleración del tren durante el impacto (modelo 2.a y 2.b)

➤ Velocidad

La Figura 63 muestra que en ambos casos la estructura logra detener el tren. Para el caso del modelo 2.a, la detención del tren se produce en un tiempo menor que el modelo 2.b. Al igual que en el modelo anterior, las mayores pendientes en la velocidad se producen al inicio del impacto y cuando se produce el plegado del elemento de absorción de energía de la topera.

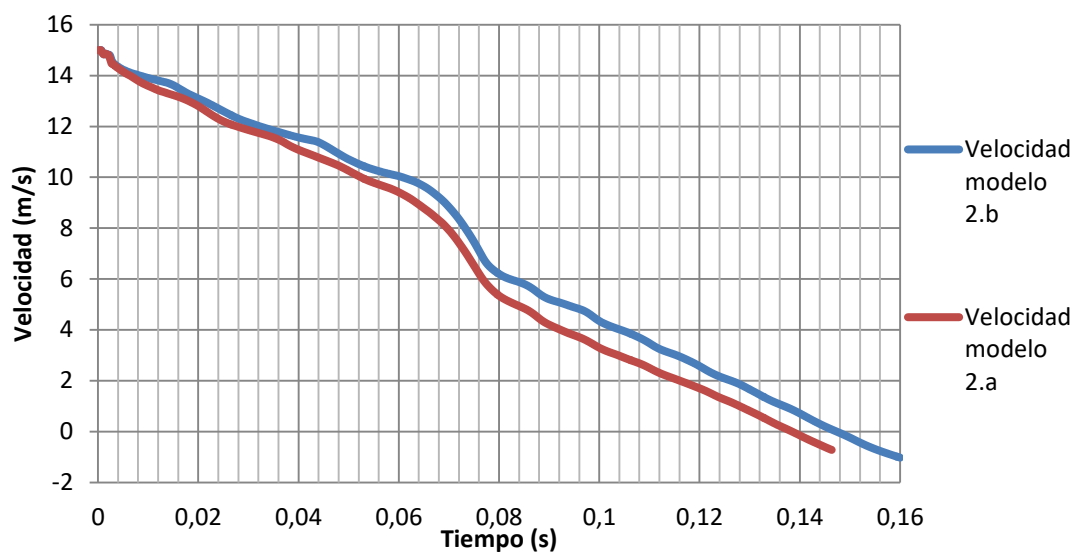


Figura 63. Velocidad en función del tiempo (modelo 2.a y 2.b)

➤ Desplazamiento

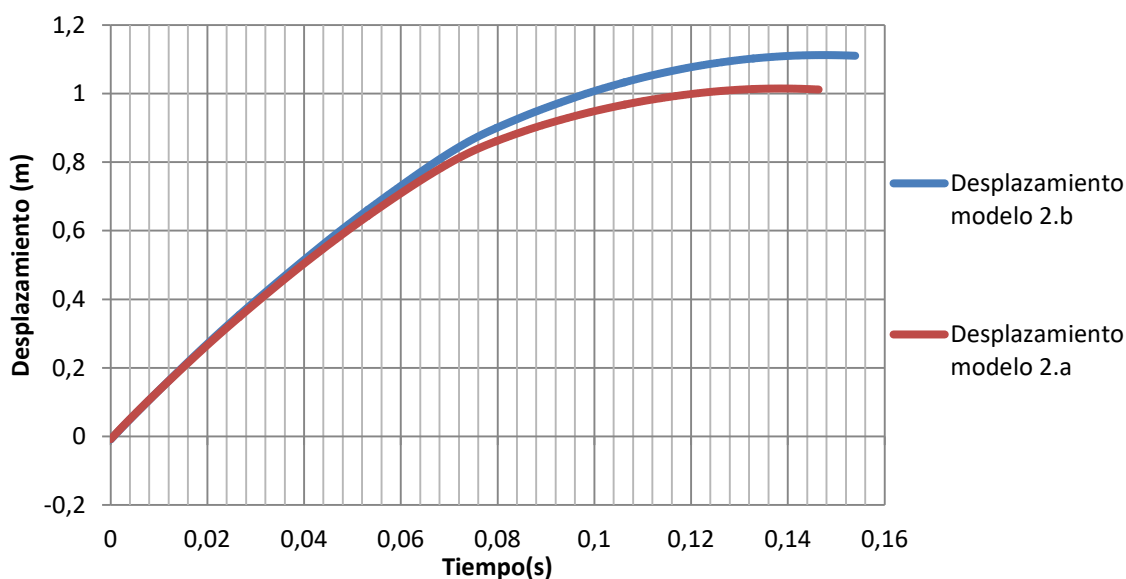
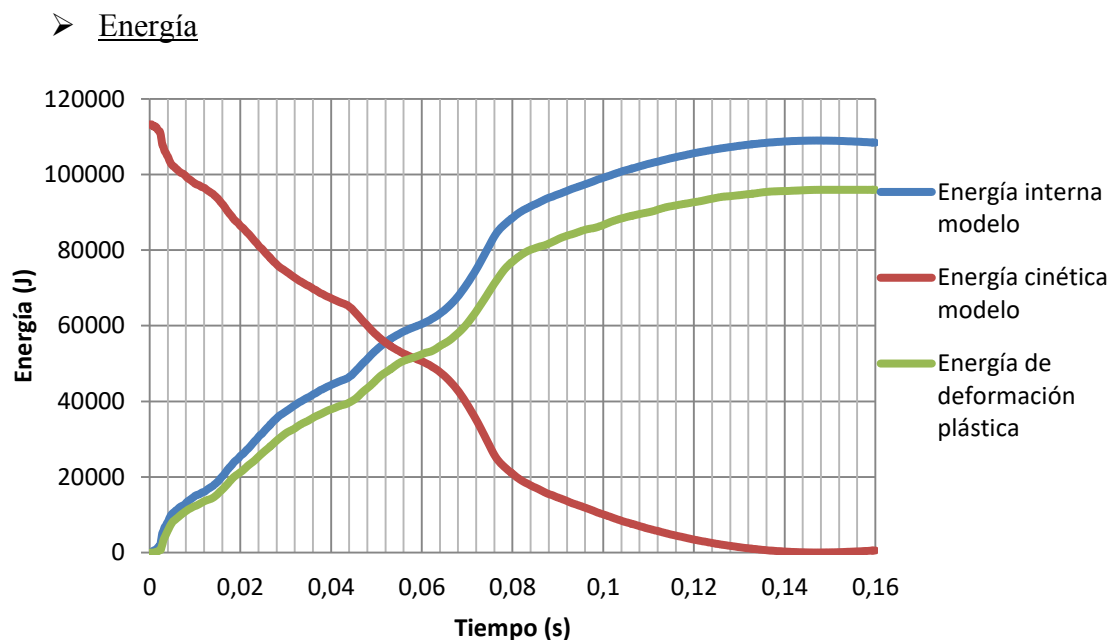


Figura 64. Desplazamiento del tren durante el impacto (modelo 2.a y 2.b)

La Figura 64 muestra que para el modelo 2.a el desplazamiento máximo es de 1.01 m, mientras que para el caso del modelo 2.b el desplazamiento que sufre el tren tras el impacto adquiere un valor de 1.11 m.





**Figura 65. Energía en función del tiempo (modelo 2.a y 2.b)**

Los valores de energía son muy próximos en los dos casos, de modo que si se grafican todos se produce la superposición de líneas. Por este motivo, se ha optado por representar sólo un caso. Al igual que los anteriores modelos, la energía cinética presenta un valor inicial máximo e igual a la energía total del sistema. Esta energía se va transformando paulatinamente en energía de deformación plástica de las estructuras de absorción de energía, posibilitando de este modo el frenado del tren.

La energía cinética en ambos casos es igual y presenta un valor inicial de 113229 J. Esta se reduce progresivamente mientras se transforma en energía de deformación plástica que posibilita la deformación permanente de los elementos de absorción de energía. La energía de deformación plástica presenta unos valores máximos cuando se detiene el tren igual a 95.721 J y 95.943 J para los modelos a y b respectivamente, de modo que ambos disipan aproximadamente la misma cantidad de energía durante el proceso de plegado.

### 4.3.3 Conclusiones

Tras el análisis de ambas configuraciones, a la cual se debe añadir el modelo 1.c, se puede concluir que el comportamiento de las tres estructuras es bastante similar para el caso de estudio. Sin embargo, si observamos las simulaciones podemos extraer las siguientes conclusiones:

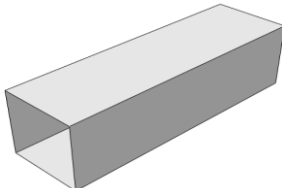
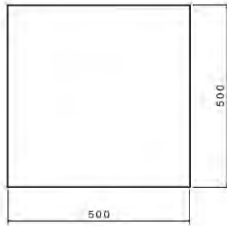
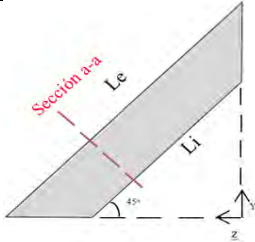
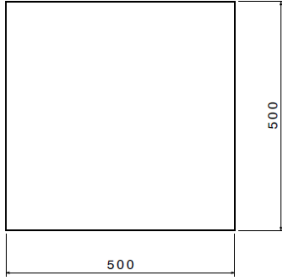
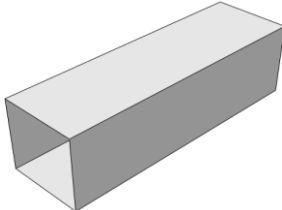
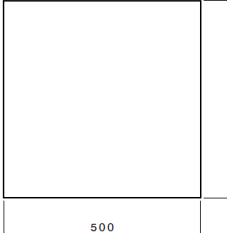
- La aceleración y, por tanto, la fuerza que se transmite sobre los pasajeros, es prácticamente igual en todos los casos. Por lo tanto, este parámetro no se puede utilizar como criterio de decisión en este caso.
- El modelo 2.a presenta un inconveniente respecto a los otros dos modelos. Cuando comienza el plegado del elemento de absorción de energía de la topera, el elemento que está empotrado al suelo (parte 1) tiende a abrirse hacia los lados (perpendicular al eje de impacto) como consecuencia de la fuerza que se produce. Esto se traduce en una mayor dificultad para la deformación del elemento.
- La introducción de un elemento oblicuo en el modelo 2.b posibilita que las tensiones de los elementos de la parte 1 y las reacciones en los empotramientos sean más pequeñas con respecto al modelo 1.c. Por tanto, la estructura es capaz de soportar mayores fuerzas sin colapsar, posibilitando de este modo un análisis más amplio en cuanto a la configuración final del modelo (prueba de diferentes secciones, espesores, longitudes, etc.).
- La mayor estabilidad del sistema proporcionada por el modelo 2.b permite que el plegado secuencial de los elementos sea más eficiente con respecto a los otros.

Por todas estas razones, a partir de este momento, la configuración seleccionada para la parte 1 es la que presenta el modelo 2.b. La forma geométrica de los elementos se mantiene constante para todos los modelos, ya que se considera suficientemente resistente como para soportar las cargas de forma adecuada.

## 4.4 Modelo 3

Una vez seleccionadas las relaciones cualitativas entre los espesores y la forma que van a tener los elementos que están empotrados al suelo, se debe comprobar que la longitud y el área de las secciones de los elementos que se emplean son óptimos para la continuación de la mejora del modelo. Para ello, se analiza un modelo cuyos elementos de absorción de energía son más cortos y otro cuyas secciones son más grandes.

Los diseños presentan los mismos elementos que el modelo 2.b, incluyendo el valor de los espesores (Tabla 7). El modelo 3.a es aquel en el cual el elemento de absorción de energía del tren y de la topera se reduce a la mitad (0,5m). Para el modelo 3.b de mayor sección hay que definir la geometría (Tabla 8).

PARTE	LONGITUD	SECCIÓN
1-Correspondiente con el tubo vertical	 $L = 1.25 \text{ m}$	
1- Correspondiente al elemento inclinado	 $Le = \frac{5\sqrt{2}}{4} \text{ m}$	
2- Elemento que absorbe energía en topera	 $L = 1 \text{ m}$	

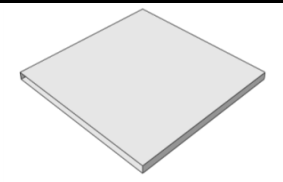
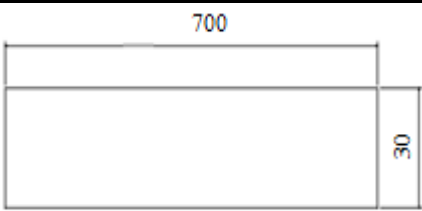
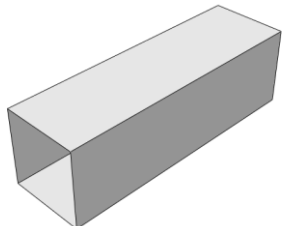
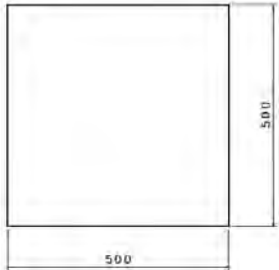
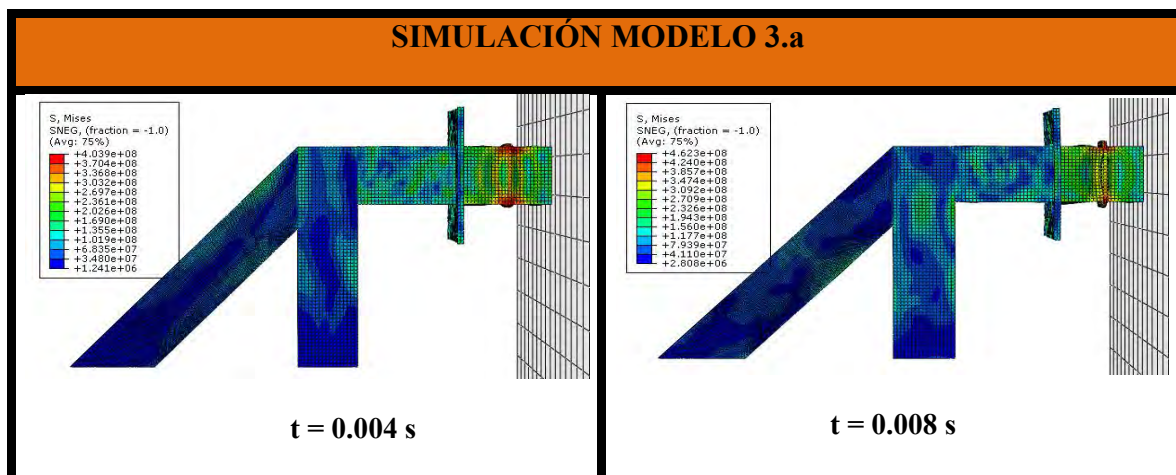
<p><b>2- Placa</b></p>	 <p>L= 0.7 m</p>	
<p><b>3 – Elemento que absorbe energía del tren</b></p>	 <p>L = 1 m</p>	

Tabla 8. Definición geometría modelo 3.b

#### 4.4.1 Simulación

A continuación se muestran las simulaciones de impactos para ambos modelos. En ellas se observa el proceso de deformaciones así como las tensiones que sufre la estructura a consecuencia de los pliegues y fuerzas generadas.



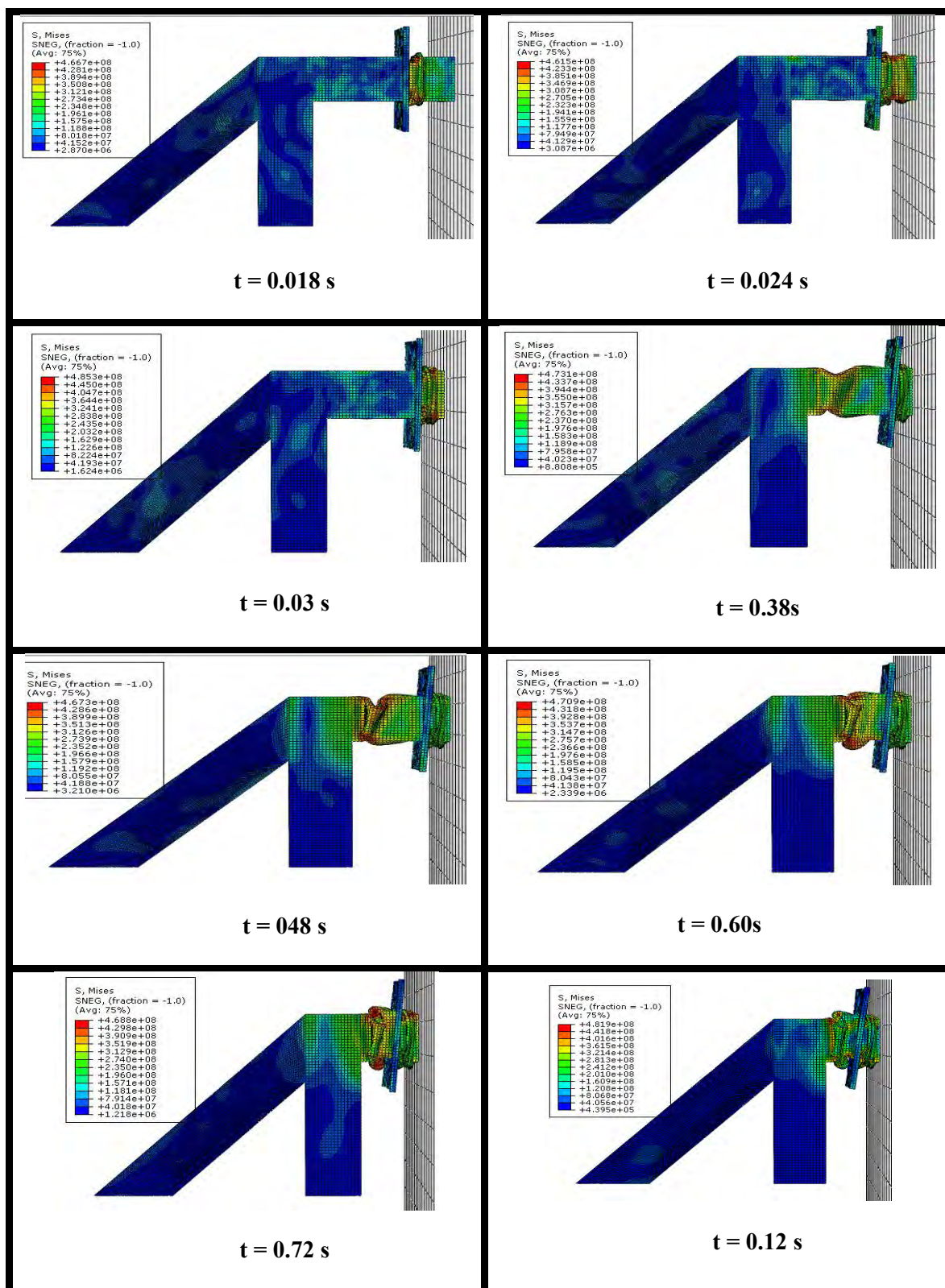
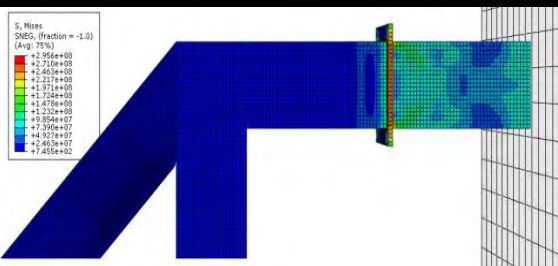


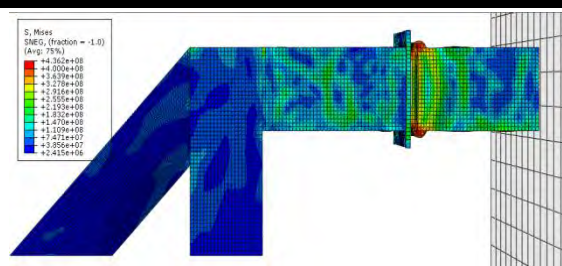
Figura 66. Proceso de deformación del modelo 3.a en función del tiempo



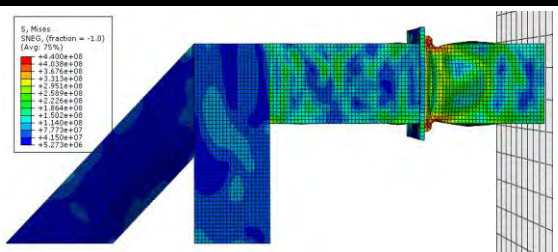
### SIMULACIÓN MODELO 3.b



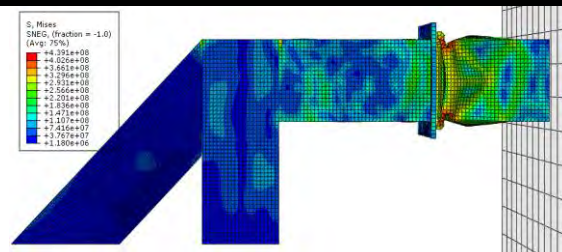
$t = 0.035s$



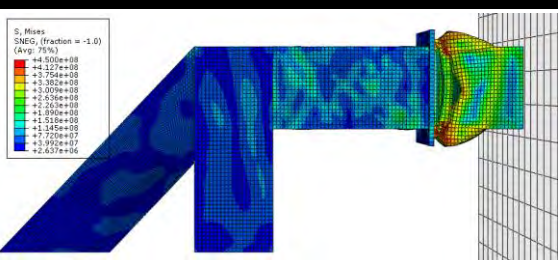
$t = 0.012 s$



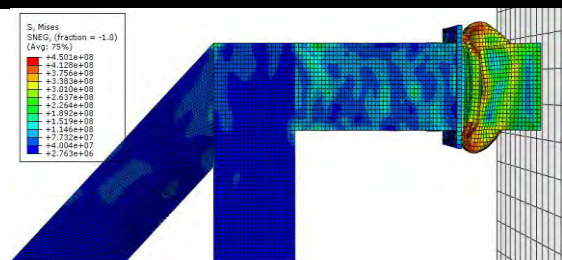
$t = 0.018 s$



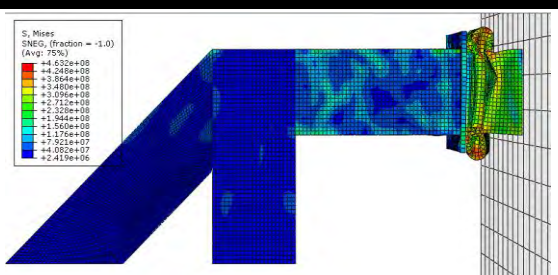
$t = 0.022 s$



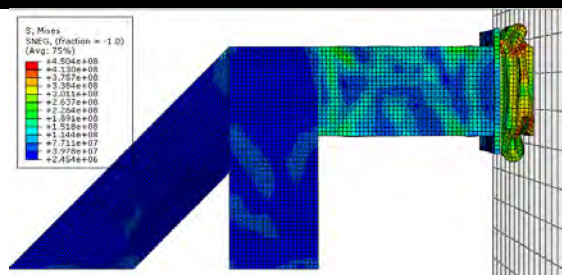
$t = 0.037 s$



$t = 0.045 s$



$t = 0.06 s$



$t = 0.078 s$

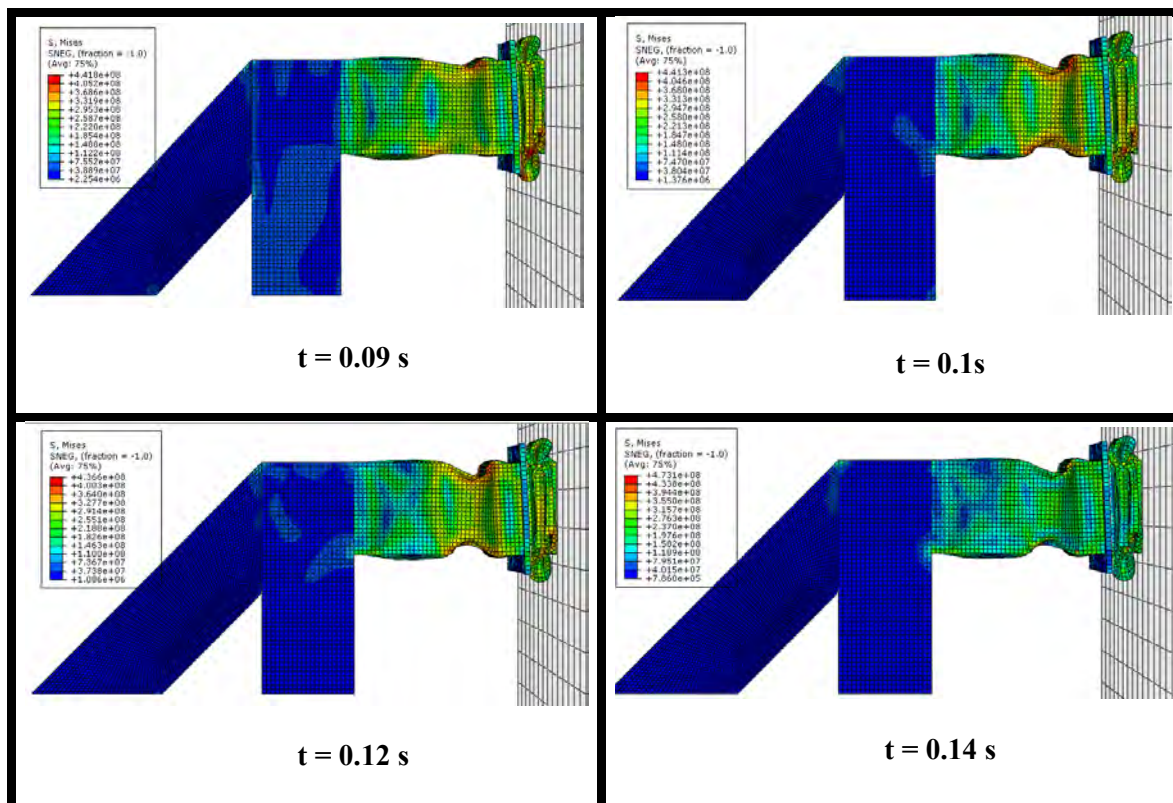


Figura 67. Proceso de deformación del modelo 3.b en función del tiempo

#### 4.4.2 Parámetros característicos

##### ➤ Aceleración

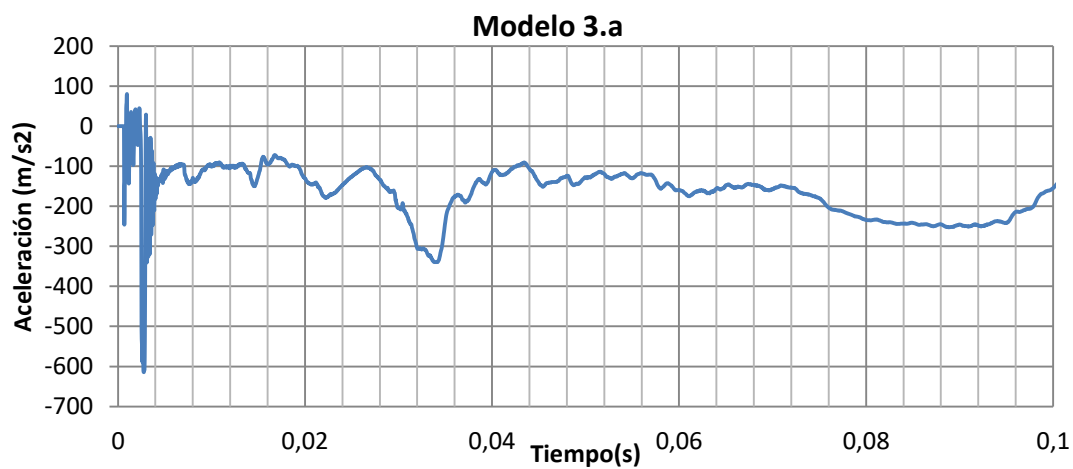
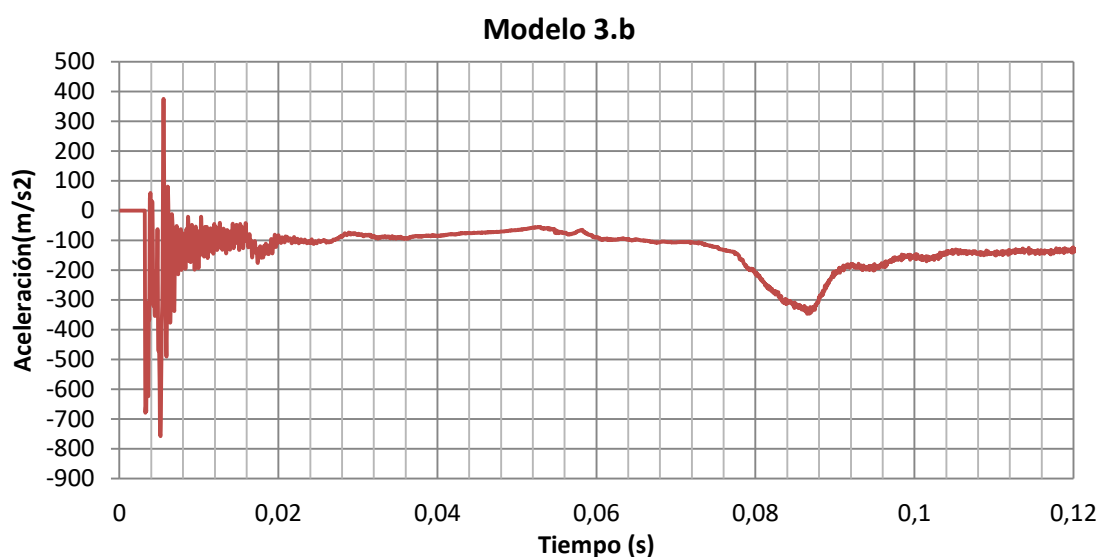


Figura 68. Evolución de la aceleración del tren durante el impacto (modelo 3.a)



**Figura 69. Evolución de la aceleración del tren durante el impacto (modelo 3.b)**

Como se observa en la Figura 68 y Figura 69 la deceleración del tren muestra unos resultados esperados. En el modelo 3.a siguen existiendo dos picos de deceleración iniciales que alcanzan valores máximos de  $-614 \text{ m/s}^2$ . Además, se siguen observando picos menores que son los que muestran los pliegues que se producen en los elementos como consecuencia del impacto. Hay un segundo pico grande que se corresponde con el primer pliegue del elemento de la topera.

Por su parte, el modelo 3.b presenta un comportamiento un poco diferente en el transcurso desde que se produce el plegado del elemento que va en el tren hasta que se inicia el plegado del elemento de la topera. Se observa durante el comienzo de la formación del primer pliegue una fuerte deceleración la cual va seguida de deceleraciones mucho más suaves que para el modelo 3.b. El pico máximo de deceleración alcanza un valor máximo de  $-750 \text{ m/s}^2$  y, posteriormente, hay un segundo pico consecuencia del primer plegado del elemento de la topera.

#### ➤ Velocidad

En el caso del modelo 3.a la detención del tren se produce antes que en el modelo 3.b, siendo los tiempos de detención de 0.092s y 0.11s respectivamente. Esto se



debe a que el modelo 3.a tiene una longitud menor y, por tanto, se producen más pliegues que absorben la energía en menos tiempo.

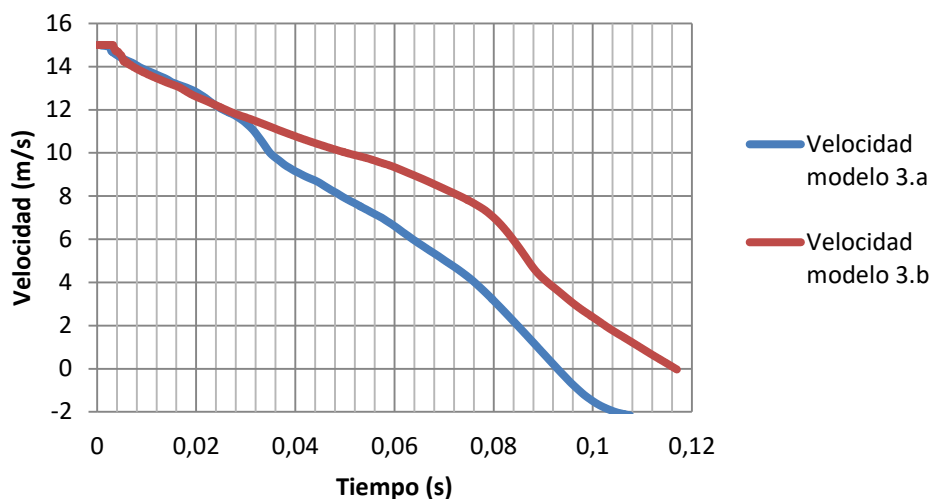


Figura 70. Velocidad en función del tiempo (modelo 3.a y 3.b)

➤ Desplazamiento

El desplazamiento recorrido por el tren cuando impacta con la estructura 3.a es de 0,77 m mientras que tras el impacto con la estructura 3.b el tren sufre un desplazamiento igual a 0,93 m. Los resultados son lógicos a la vista de las deformaciones de la estructura y teniendo en cuenta las longitudes de cada estructura.

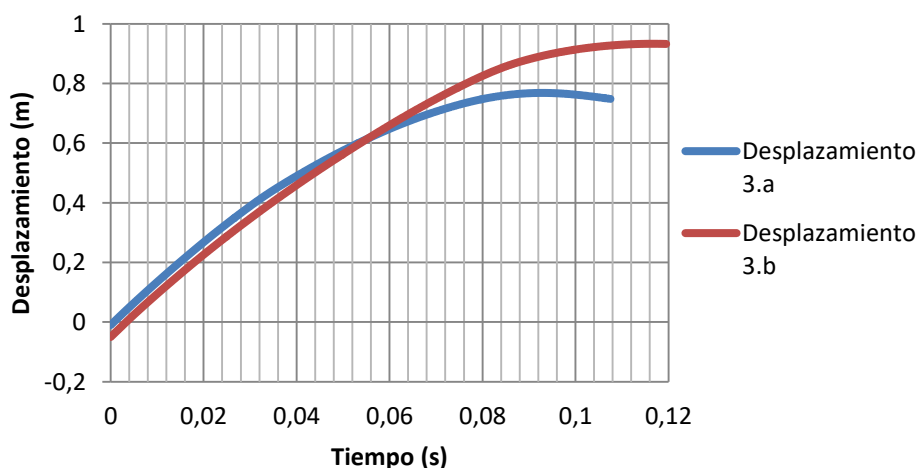


Figura 71. Desplazamiento del tren durante el impacto (modelo 3.a y 3.b)

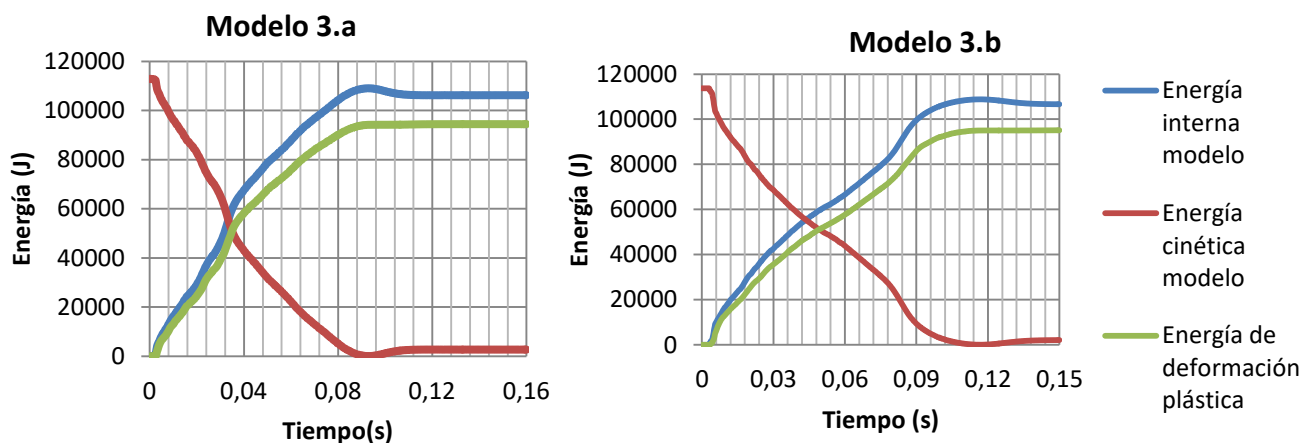
➤ Energía

Figura 72. Energía del sistema en función del tiempo (modelo 3.a y 3.b).

En la Figura 72 se puede observar que la energía cinética en el modelo 3.a tiene mayor pendiente que en el modelo 3.b. La energía de disipación plástica adquiere un valor máximo similar para ambas estructuras. Sin embargo, las curvas que describen el proceso de transformación de energía cinética en energía de deformación plástica son un poco diferentes. Es decir, esto muestra que el recorrido de la estructura para disipar la casi la misma cantidad de energía es diferente en el tiempo debido al número de pliegues y al tiempo durante el cual se producen.

#### 4.4.3 Conclusiones

Las conclusiones que se pueden obtener tras este análisis son:

- Si se presenta una estructura cuyos elementos tiene una mayor sección que otra estructura, las deceleraciones es también mayor. Esto implica que, para una mismo tipo de sección, es más favorable que esta misma más pequeña.
- Por otro lado, en lo que concierne al modelo 3.a, se demuestra que al utilizar una estructura cuyos elementos son más cortos, la disipación energética es más rápida, ya que se aprovecha la totalidad del material. Sin embargo, el uso

de elementos más cortos impide la reducción de los espesores de los elementos puesto que la estructura no sería capaz de detener el tren. Por lo tanto, si se quiere reducir la deceleración disminuyendo el espesor, es necesario que los elementos sean suficientemente largos como para absorber la misma energía en un tiempo mayor.

- Se debe prestar atención sobre el hecho de la elección en las longitudes de los elementos de absorción de energía. Una excesiva medida de estos podría producir el pandeo del elemento y en consecuencia se perderían su capacidad de disipación de energía.

## 4.5 Modelo 4

Una vez se ha estudiado la forma de los elementos que están empotrados al suelo, la relación de espesores entre los diferentes elementos y las características geométricas de longitud y área de la sección de impacto, se procede a la reducción de la deceleración que sufre el tren.

Para conseguir dicha mejora, se analizan diferentes formas de sección de las partes 2 y 3 con diferentes espesores según lo requiera la estructura.

En primer lugar, se estudian diferentes secciones con elementos de una única celda, siendo el cuadrado y el círculo las secciones seleccionadas (Figura 73).

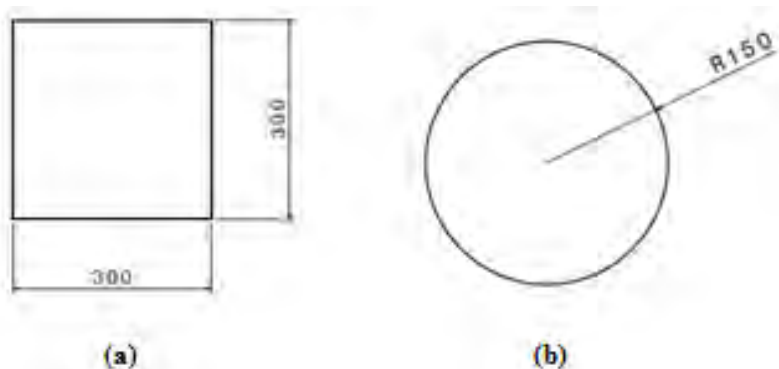
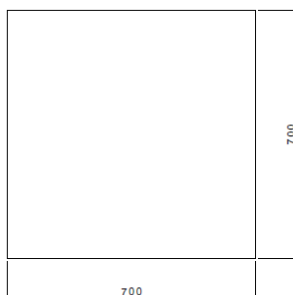


Figura 73. Secciones de estudio de celda única (modelo 4)

La longitud de los elementos es la misma que en el modelo 2.b (Véase Tabla 7). Además se sustituye la placa utilizada hasta ahora en la parte 2 por una placa plana, de modo que se pretende tener un único pico de deceleración inicial en vez de dos. Las dimensiones de esta placa plana son las siguientes:



**Figura 74. Dimensiones nueva placa modelo 4**

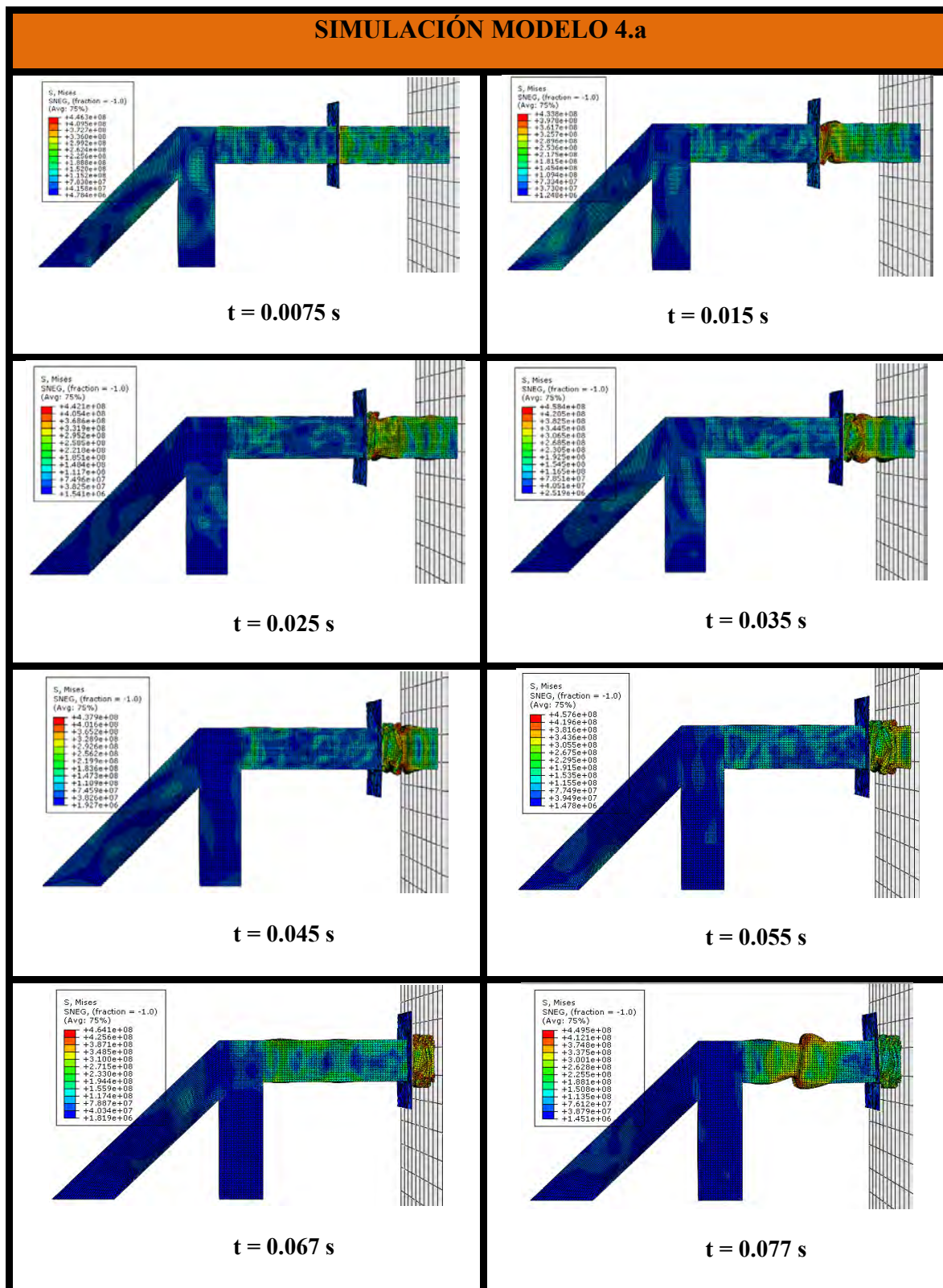
El objetivo de este modelo es reducir la deceleración inicial y los sucesivos picos que se producen durante el proceso. Si se emplean los espesores utilizados en el modelo2 (Tabla 7), los resultados muestran que su valor se puede reducir para reducir la fuerza que se transmite sobre el tren.

Por lo tanto, la elección de espesores que se muestra a continuación es la más óptima evaluada (teniendo en cuenta cambios en el espesor del orden de varios milímetros) para las secciones que se van a estudiar.

	Parte 1	Parte 2- Tubo horizontal	Parte 2- Placa Plana	Parte 3
Espesor sección cuadrada (mm)	9	2,5	9	1,6
Espesor sección circular (mm)	9	2	9	1,3

**Tabla 9. Definición de espesores modelo 4.a y 4.b**

## 4.5.1 Simulación





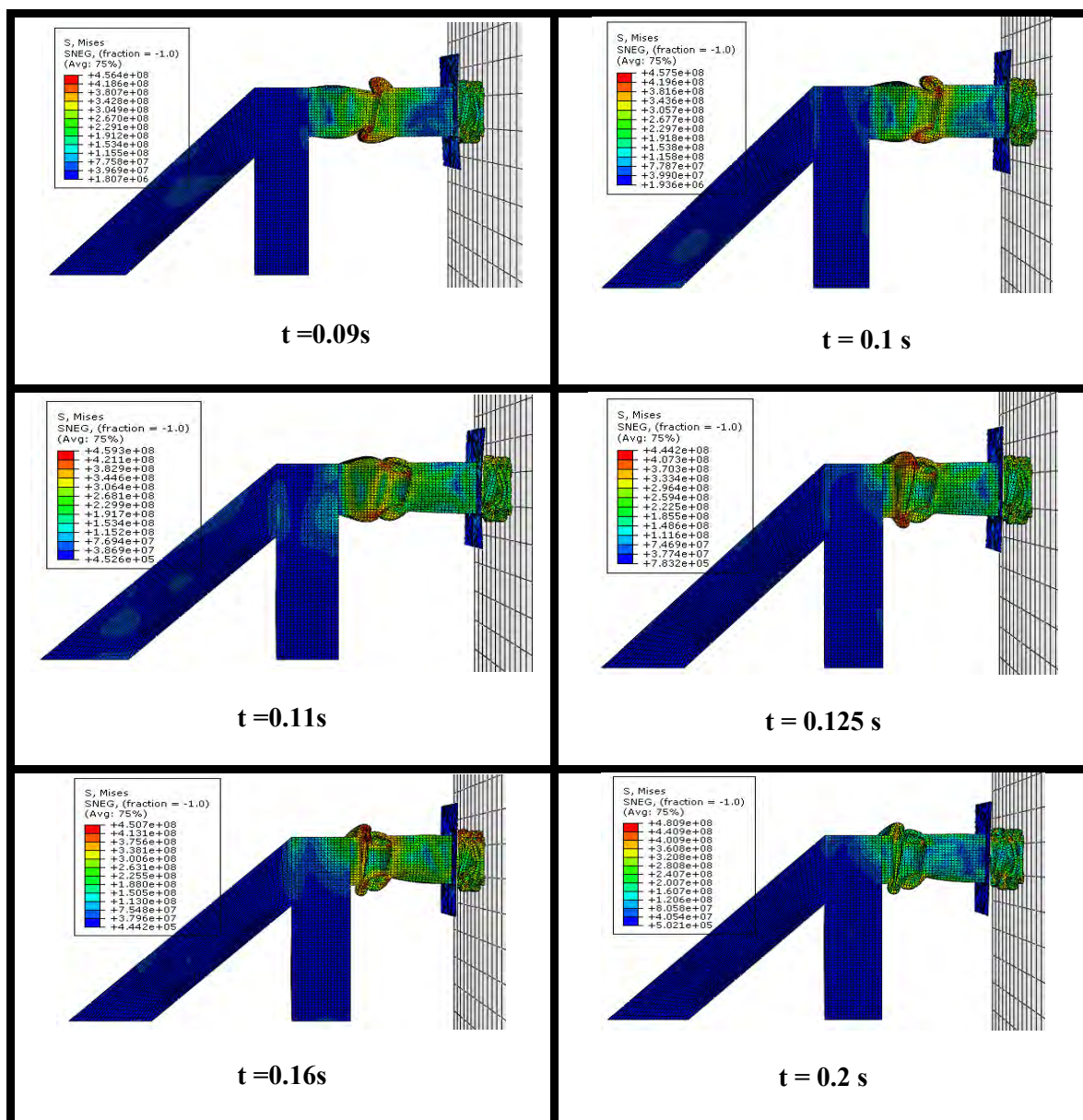
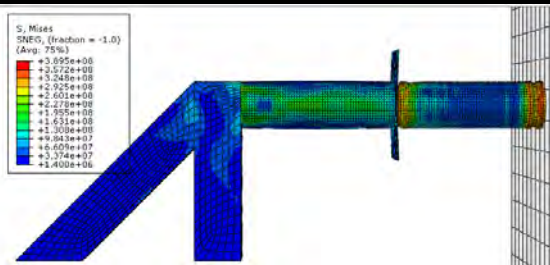
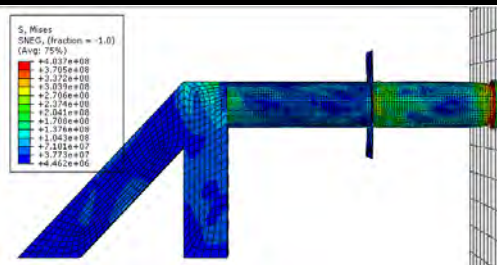


Figura 75. Proceso de deformación del modelo 4.a en función del tiempo

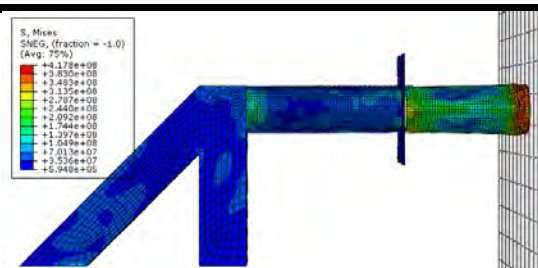
### SIMULACIÓN MODELO 4.b



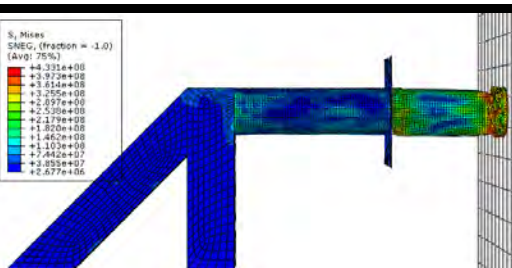
$t = 0.005 \text{ s}$



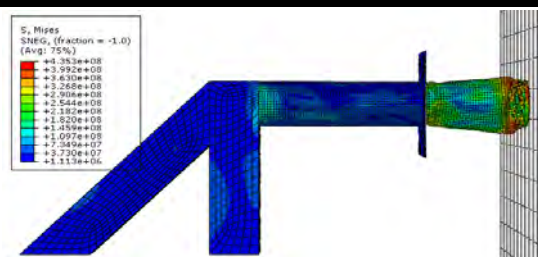
$t = 0.01 \text{ s}$



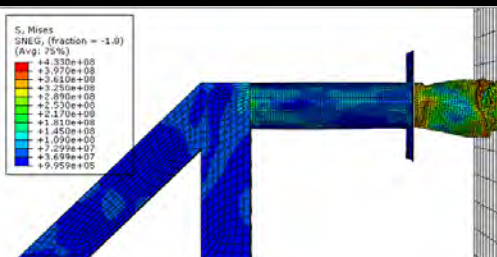
$t = 0.015 \text{ s}$



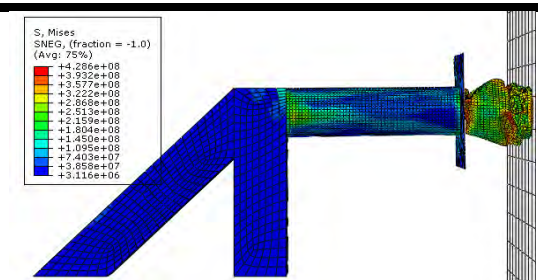
$t = 0.02 \text{ s}$



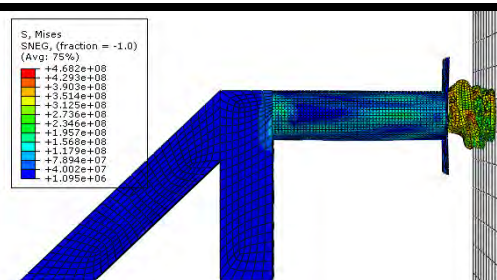
$t = 0.028 \text{ s}$



$t = 0.035 \text{ s}$



$t = 0.047 \text{ s}$



$t = 0.055 \text{ s}$



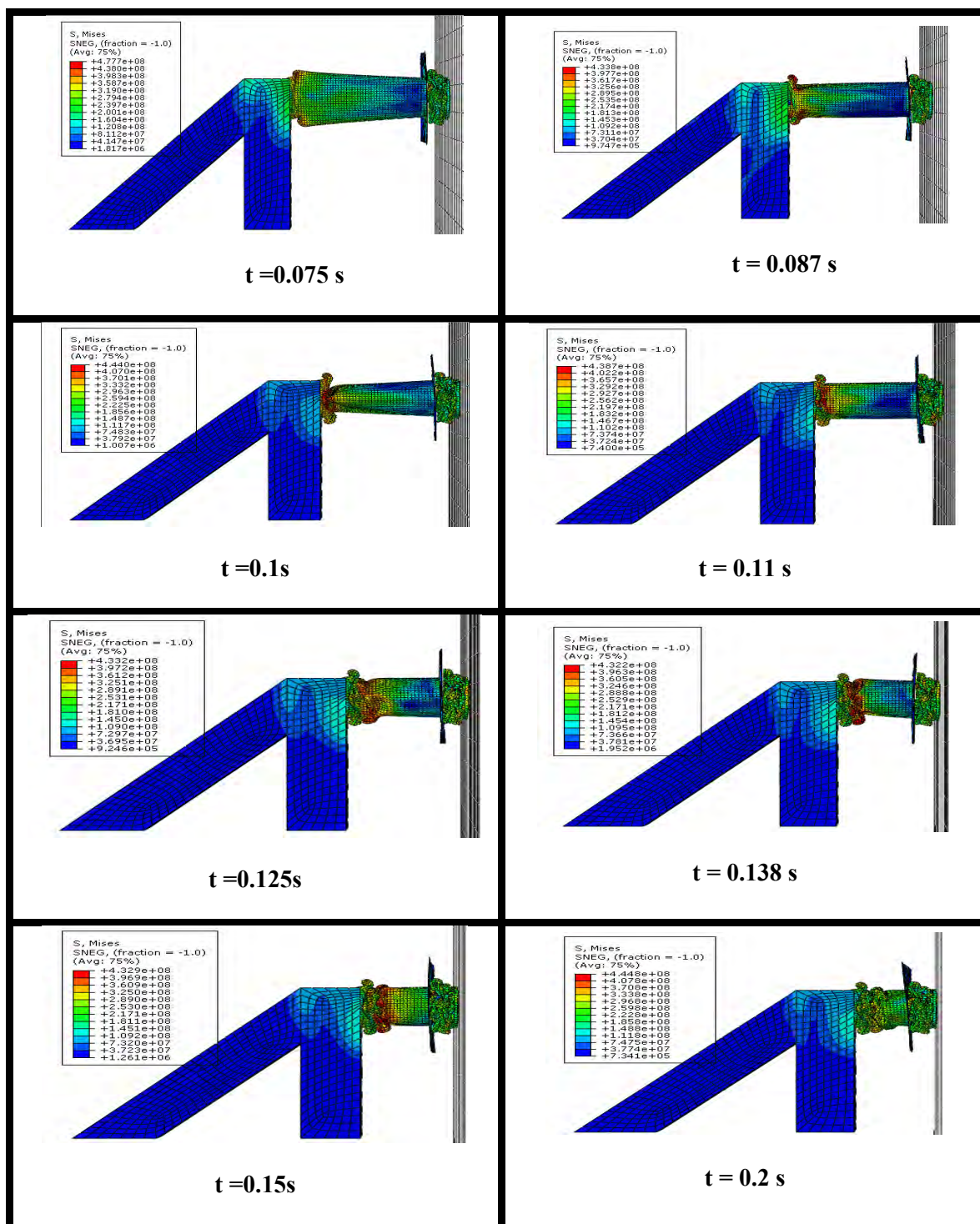


Figura 76. Proceso de deformación del modelo 4.b en función del tiempo

#### 4.5.2 Parámetros característicos

A continuación se muestran los principales parámetros para ambos modelos de modo que se pueda analizar su desarrollo durante el impacto.

➤ Aceleración

Dado que la aceleración del tren es el criterio más importante de mejora para la estructura analizada, los resultados para las distintas secciones se dibujarán sobre gráficas diferentes

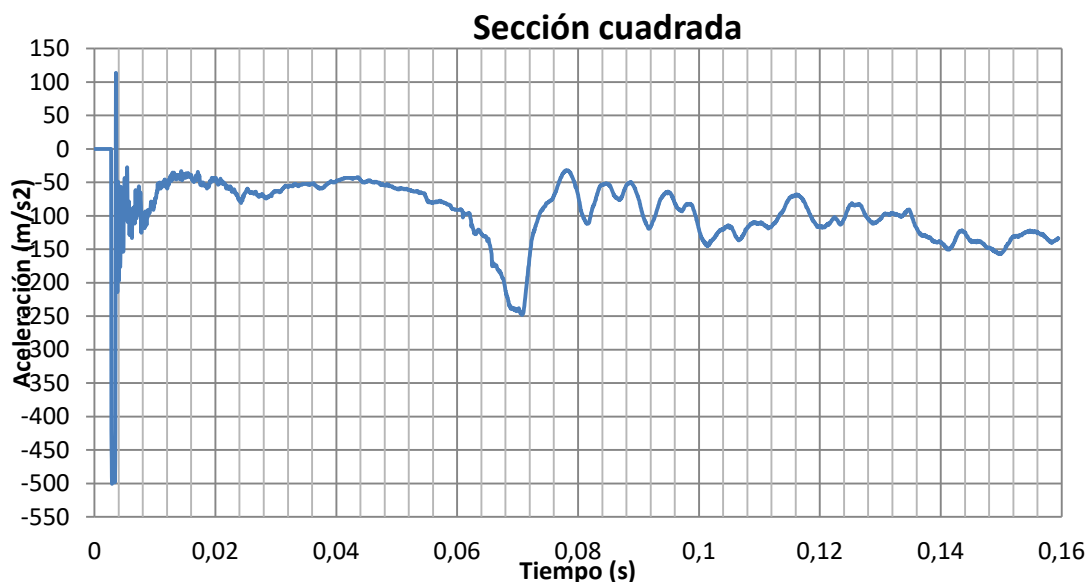
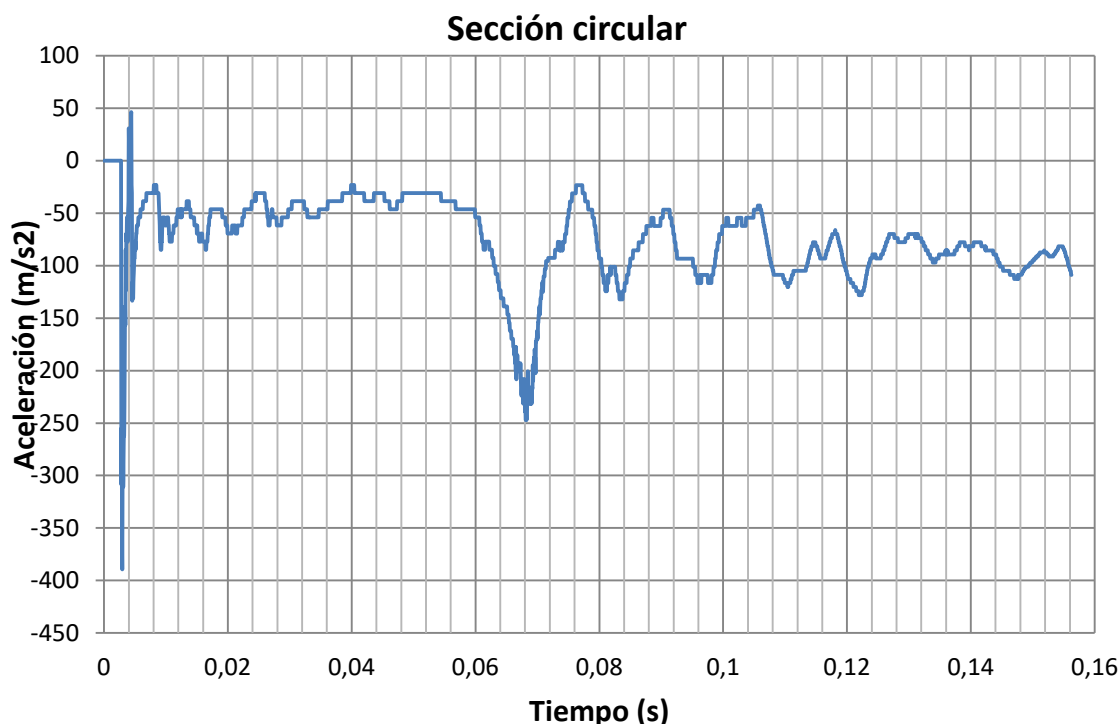


Figura 77. Evolución de la aceleración del tren durante el impacto (modelo 4.a)

Como se ve en la Figura 77, con el cambio de la placa, se ha conseguido subsanar la aparición de los dos picos de deceleración presentes en el inicio del proceso. En esta ocasión, aparece un pico inicial que presenta un valor de  $-500 \text{ m/s}^2$ , lo que demuestra que la reducción del espesor respecto al modelo 2.b se traduce en una disminución del valor inicial de desaceleración. Además, al reducir los espesores, el plegado del elemento que va en el tren se produce en un tiempo menor. Posteriormente, aparece el segundo pico de desaceleración importante del proceso que coincide con el primer pliegue del elemento de absorción de energía de la topera y que presenta un valor menor que en el modelo 2.b.

Las mejoras en lo referente a la desaceleración se producen porque se forman más pliegues (se utiliza prácticamente la totalidad de la longitud de ambos elementos) y, por tanto, cada pliegue absorbe menos energía, de modo que la fuerza que se transmite sobre el tren es menor.



**Figura 78. Evolución de la aceleración del tren durante el impacto (modelo 4.b)**

La Figura 78 muestra la evolución de la deceleración durante el impacto. Al igual que ocurre con el modelo de sección cuadrada, los valores obtenidos presentan una forma similar. Sin embargo, en este caso, el pico de desaceleración inicial presenta un valor igual a  $-390 \text{ m/s}^2$  lo que supone una mejora frente al modelo de sección cuadrada.

También se puede comprobar que, como en el modelo de sección cuadrada, los picos de deceleración que se forman tras el comienzo del plegado del elemento que va en la topera son mayores que los que se generan como consecuencia del plegado del elemento que va en el tren. Esto se debe a la diferencia de espesores existente entre ambos elementos (un mayor espesor, se traduce en un valor de deceleración mayor).

➤ Velocidad

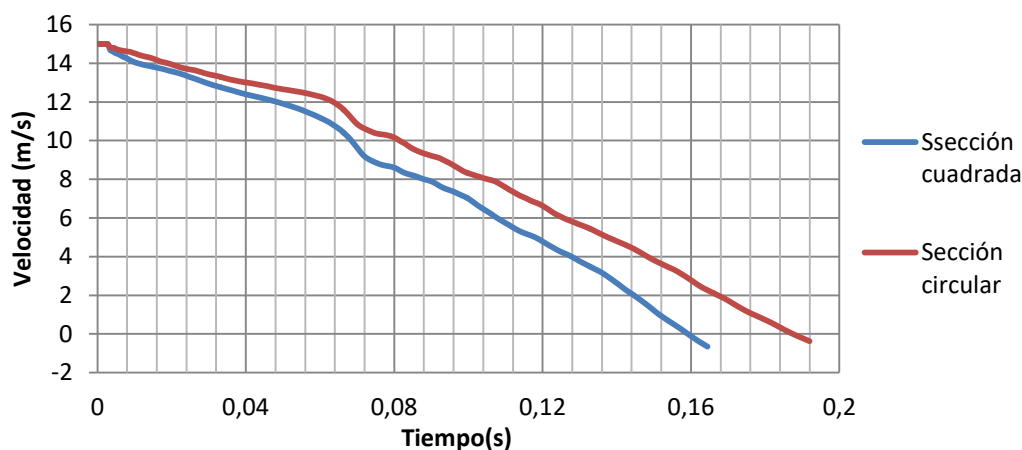


Figura 79. Velocidad en función del tiempo (modelo 4.a y 4.b)

La Figura 79 muestra que la velocidad se reduce más rápidamente en el modelo que presenta sección cuadrada, de forma que el tren se detiene en un tiempo de 0,16 s. Por otro lado, la estructura del modelo 4.b consigue detener al tren en un tiempo mayor e igual a 0,187 s.

➤ Desplazamiento

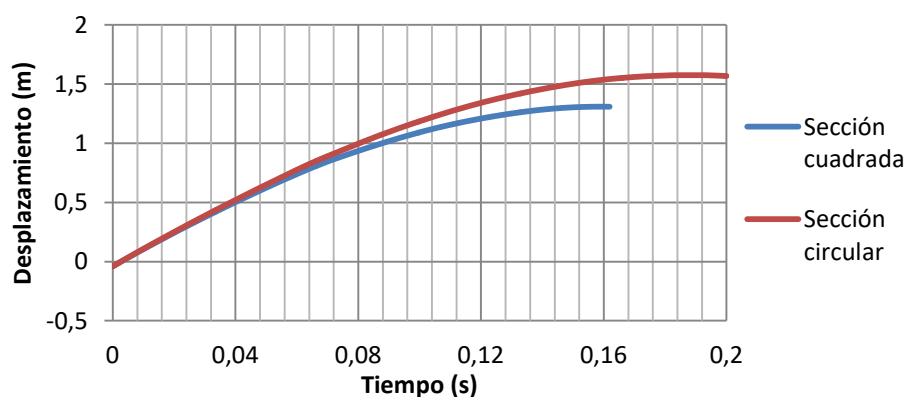
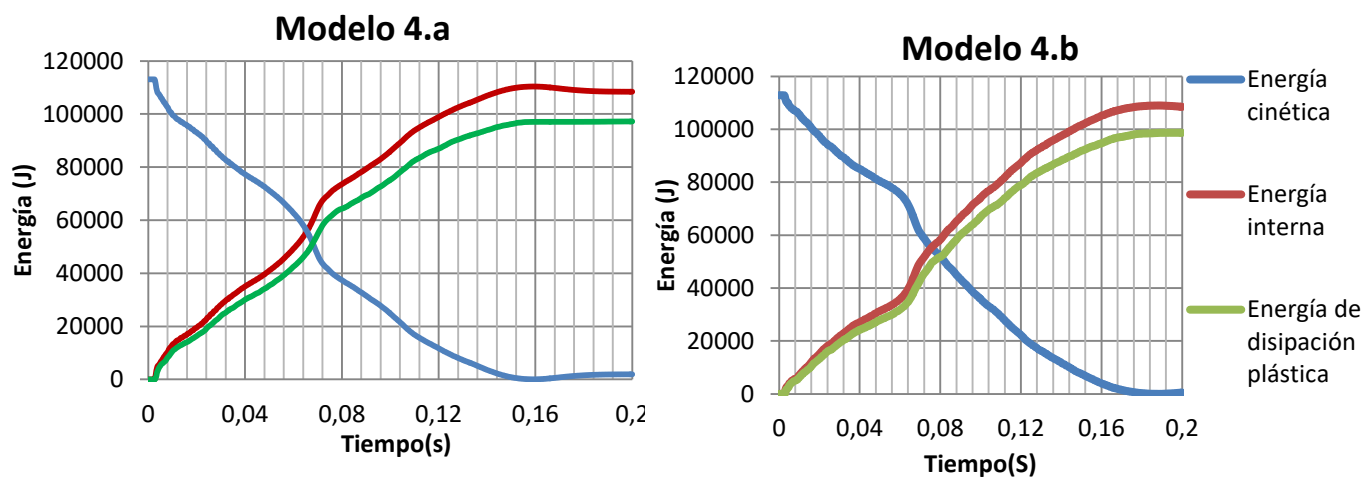


Figura 80. Desplazamiento del tren durante el impacto (modelo 4.a y 4.b)

A la vista de la Figura 80, el máximo desplazamiento del tren ocurre cuando el tren se detiene. Los valores de desplazamiento máximo son de 1,3 m y 1,52 m para las secciones cuadrada y circular respectivamente.

➤ Energía

**Figura 81. Energía del sistema en función del tiempo (modelo 4.a y 4.b)**

La Figura 81 muestra la evolución de las diferentes energías del sistema para ambos modelos en función del tiempo. La energía de disipación plástica alcanza su máximo valor cuando el tren se detiene y presenta un valor de 97.211J para la sección cuadrada y 98.684 J para la circular. La evolución de la energía con el tiempo depende de la capacidad de absorción de energía (debido a la deformación de sus elementos) del sistema estructural.

### 4.5.3 Conclusiones

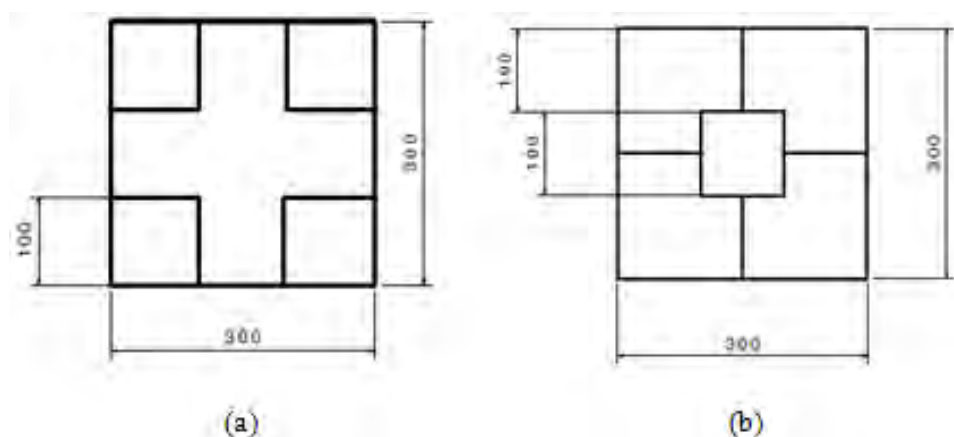
Tras analizar ambas estructuras se puede concluir que el comportamiento de la estructura con sección circular es mejor que la cuadrada. Esto se debe tanto a la forma en la cual se producen los pliegues como a la posibilidad de reducir en mayor medida los espesores en la sección circular para reducir la aceleración y, consecuentemente, la fuerza que se transmite sobre el tren.

Además el cambio en la geometría de la placa ha favorecido los resultados, de modo que ahora en el inicio del impacto únicamente hay un pico de desaceleración.

## 4.6 Modelo 5

Una vez analizados los elementos con secciones de celda única se procede a analizar secciones multicelda, que como se ha estudiado anteriormente, presentan buena capacidad de absorción de energía. Con este análisis se pretende sacar conclusiones sobre qué tipo de sección es más óptima para detener el tren.

Las secciones multicelda que se analizan son las siguientes:



**Figura 82. Secciones multicelda analizadas**

El valor de los espesores en cada uno de los elementos para las dos estructuras que se van a analizar son:

	Parte 1	Parte 2- Tubo horizontal	Parte 2- Placa Plana	Parte 3
Espesor sección (a) (mm)	12	1,3	12	1
Espesor sección (b) (mm)	12	1,5	12	1

**Tabla 10. Definición espesores modelo 5**

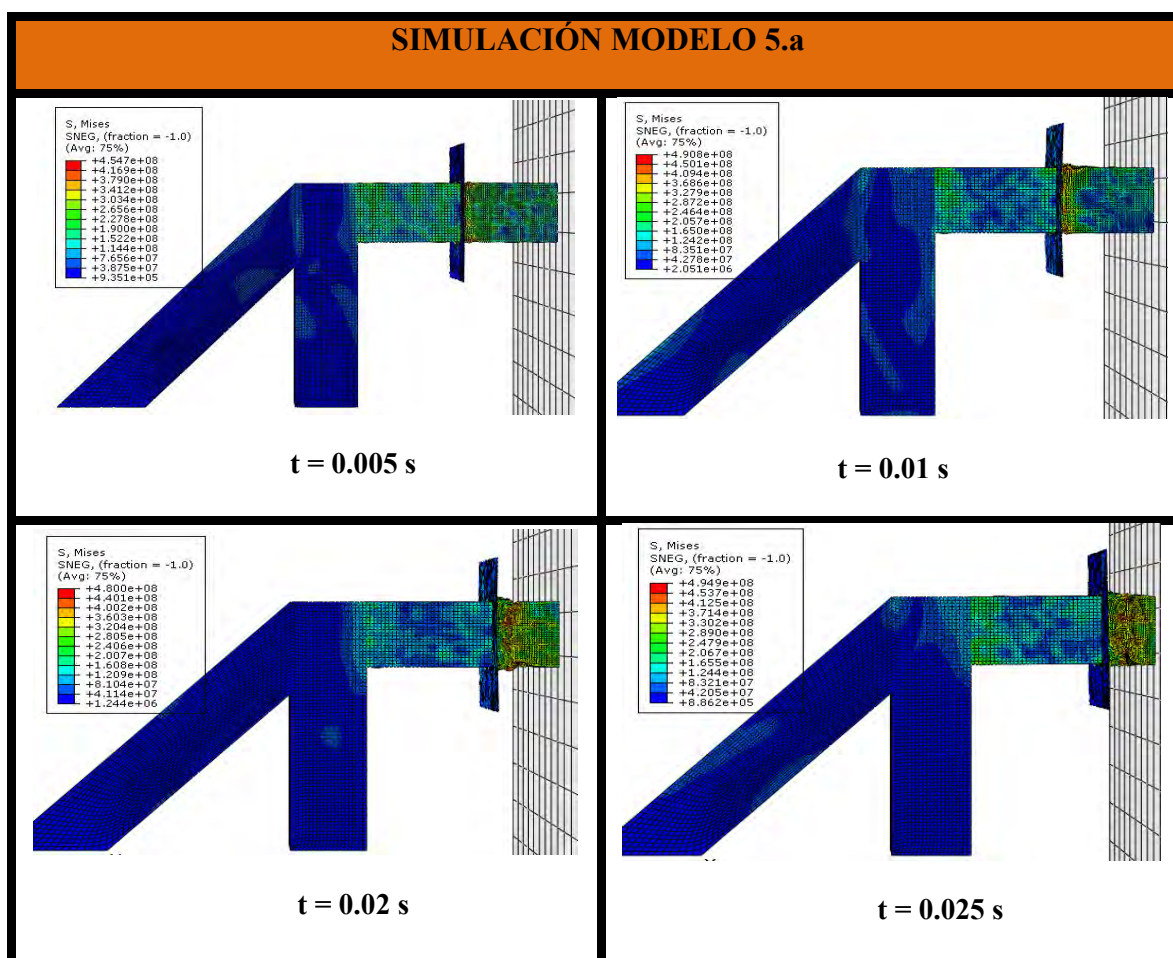
A priori se espera que la sección multicelda sea capaz de absorber gran cantidad de energía. Al ser elementos más robustos que los de celda única, en cada plegado



absorben más energía y, por tanto, parte de la longitud del elemento de la topera no es utilizada. Como el objetivo es la optimización de la estructura, se decide acortar la longitud de los elementos de la parte 2 y 3 (elemento absorción energía topera y elemento del tren). Estos pasan de medir 1 m cada uno (Véase Tabla 7) a medir 0,5 m de longitud, siendo este el único cambio en las dimensiones.

Además cabe destacar que el espesor seleccionado para el elemento del tren es de 1 mm por lo que no se podría reducir en mayor medida, de modo que estos son los elementos con dicha configuración más óptimos para el caso de estudio.

#### 4.6.1 Simulación





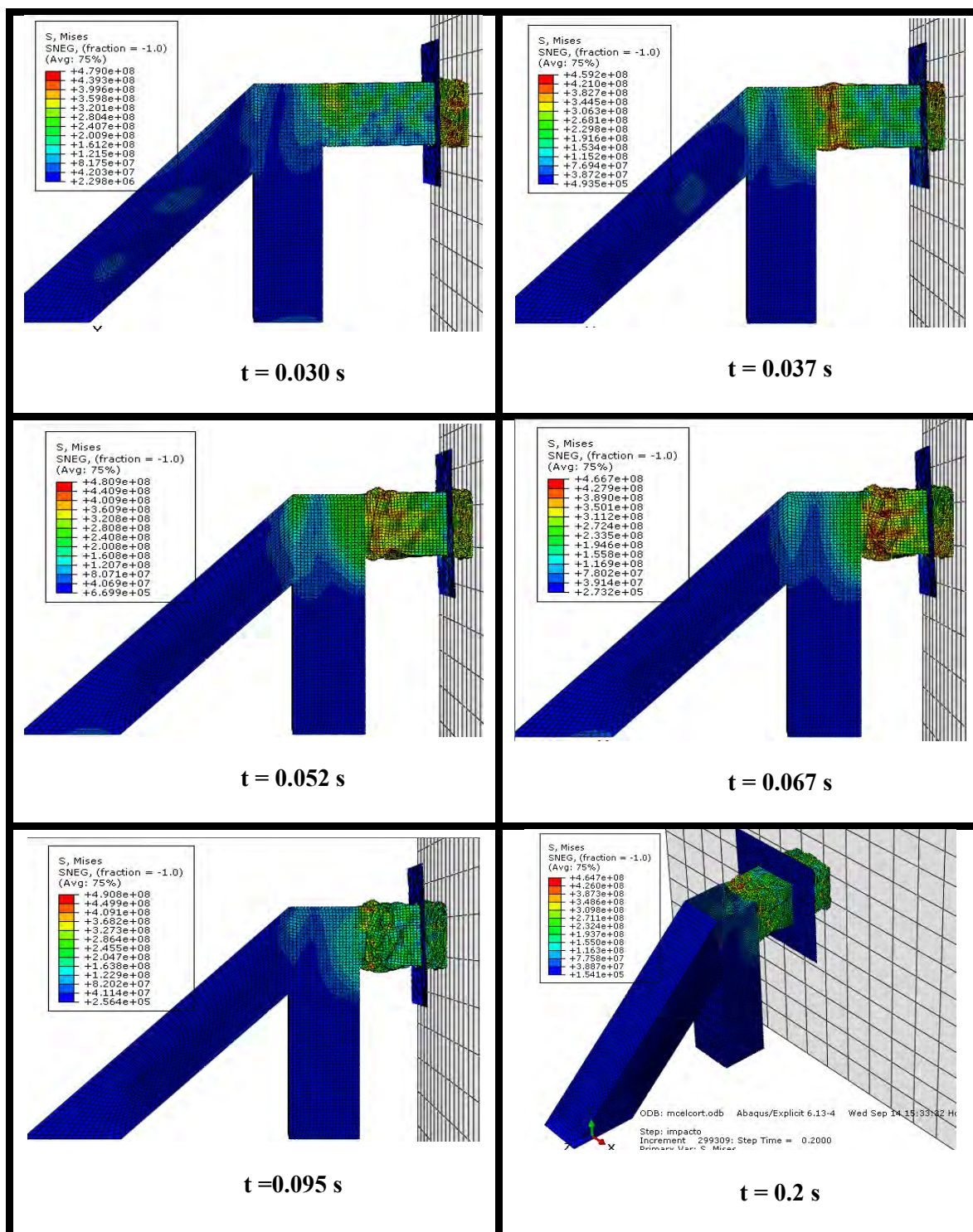
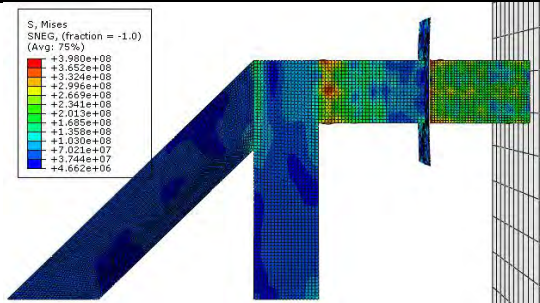
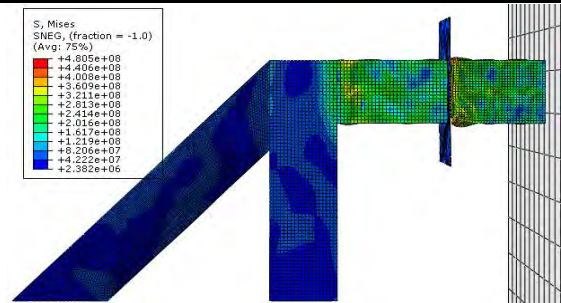


Figura 83. Proceso de deformación del modelo 5.a en función del tiempo

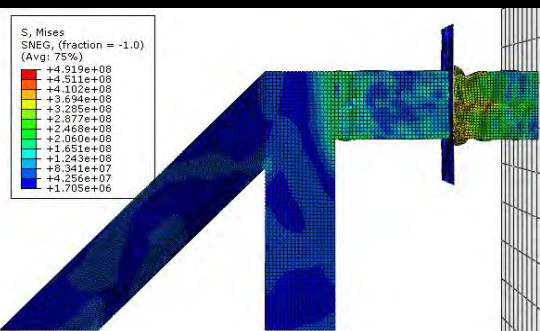
### SIMULACIÓN MODELO 5.b



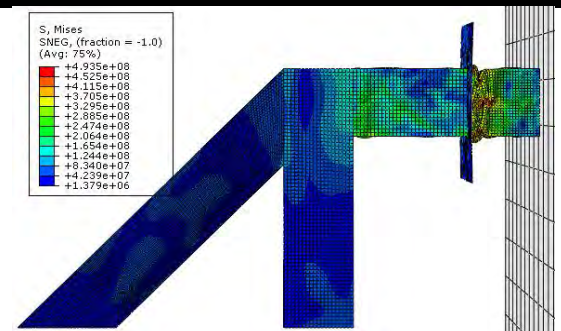
$t = 0.0037 \text{ s}$



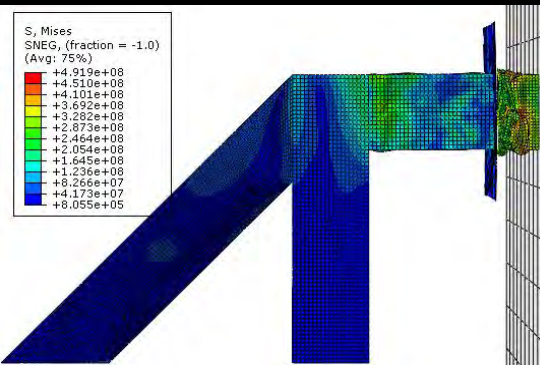
$t = 0.0075 \text{ s}$



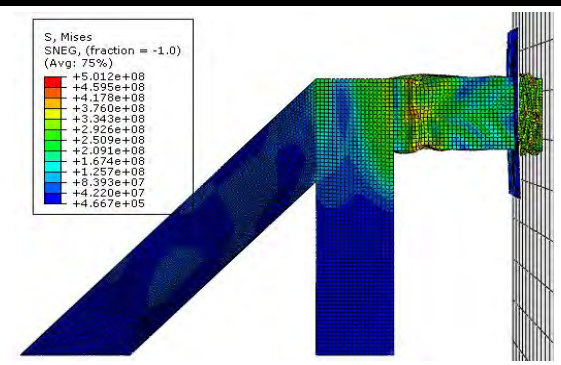
$t = 0.012 \text{ s}$



$t = 0.016 \text{ s}$



$t = 0.028 \text{ s}$



$t = 0.037 \text{ s}$



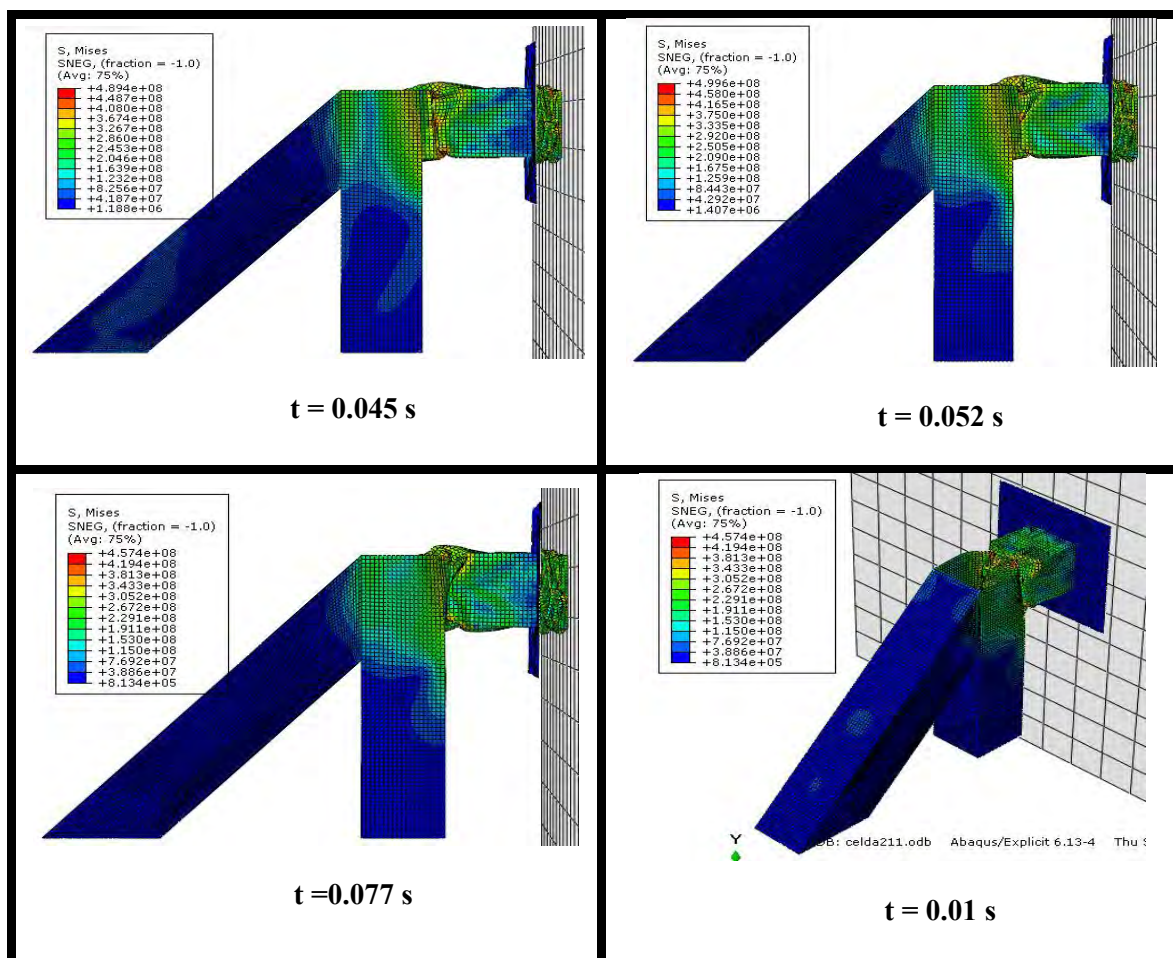


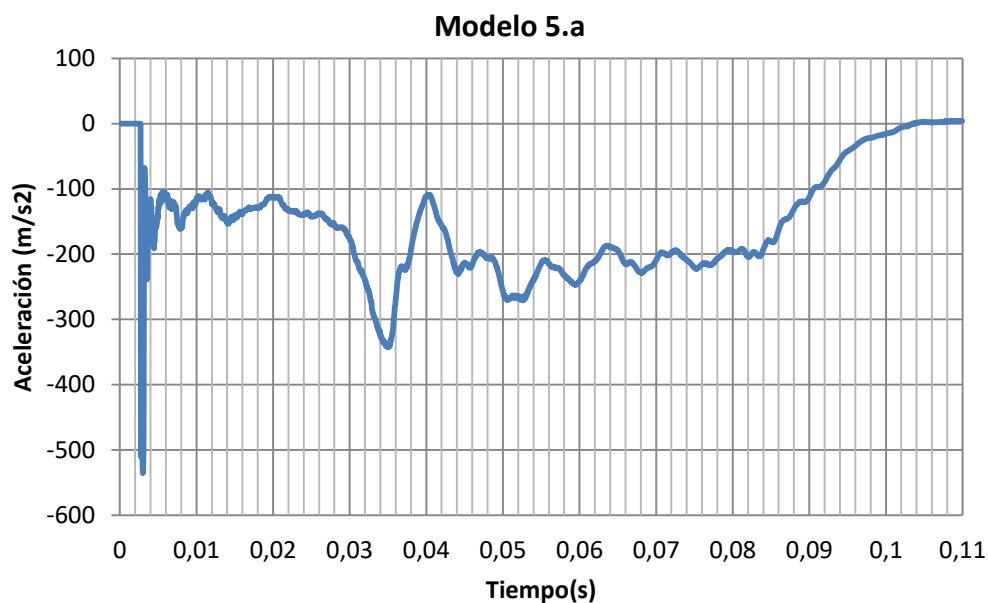
Figura 84. Proceso de deformación del modelo 5.b en función del tiempo

## 4.6.2 Parámetros característicos

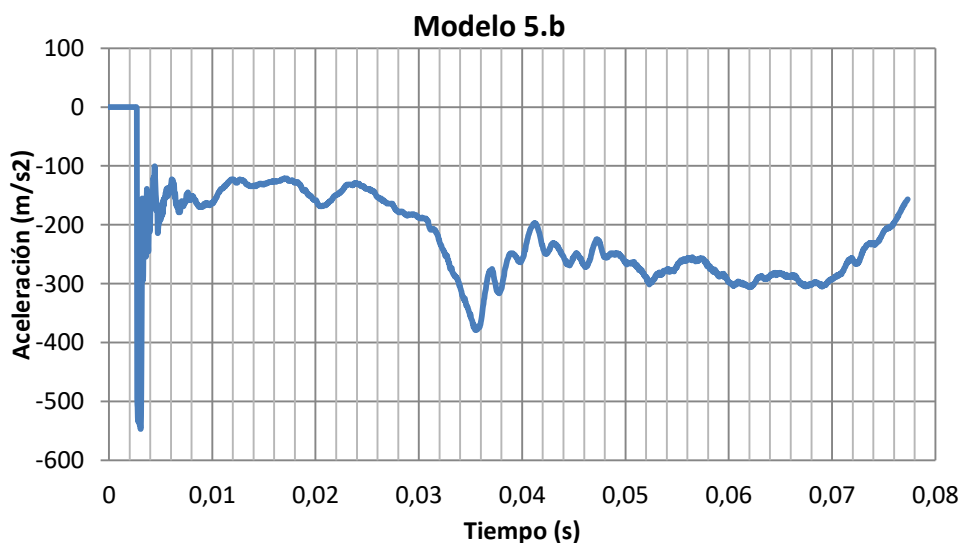
A continuación se muestran los parámetros más importantes para las dos secciones multicelda analizadas, de modo que se puedan comparar entre ambas y con los modelos ya analizados.

### ➤ Aceleración

Al igual que en los modelos anteriores, dada la importancia de este parámetro en la selección del modelo más óptimo, las gráficas de aceleración para ambas secciones se presentan por separado.



**Figura 85. Evolución de la aceleración del tren durante el impacto (modelo 5.a)**



**Figura 86. Evolución de la aceleración del tren durante el impacto (modelo 5.b)**

Como se puede comprobar en la Figura 85 y la Figura 86 los valores que se presentan son los esperados para un proceso de impacto como el que se estudia.

En ambos casos hay un pico inicial de deceleración que alcanza valores de  $535 \text{ m/s}^2$  y  $546 \text{ m/s}^2$  para los modelos a y b respectivamente. La sucesión de pliegues

que se producen a consecuencia del impacto se observa a través de los picos que se forman. Para el caso del plegado del elemento del tren, son todos los puntos que se encuentran previos al segundo gran pico ( $t \approx 0,35$  s) que presenta un valor aproximado de  $340 \text{ m/s}^2$  en el modelo a y  $380 \text{ m/s}^2$  en el modelo b. En los instantes posteriores a este, que se corresponde con el inicio del plegado de la topera, los valores de la deceleración son más altos debido a que el espesor de este elemento es mayor.

Además, si se comparan estos resultados con los de los anteriores modelos se puede ver que la aceleración promedio durante el proceso de impacto es mayor, por lo que la detención del tren tiene lugar en un tiempo menor.

➤ Velocidad

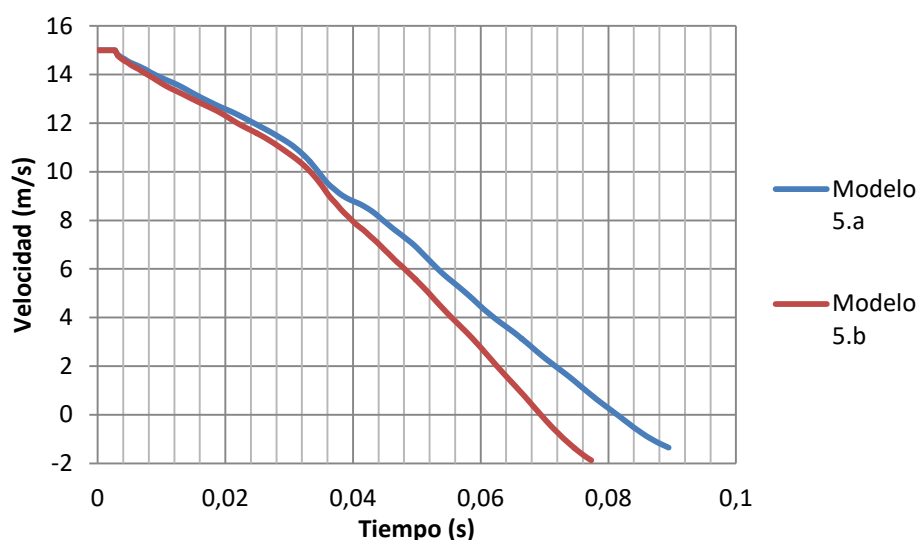


Figura 87. Velocidad en función del tiempo (modelo 5.a y 5.b)

A la vista de la Figura 87 se concluye que ambas estructuras son capaces de detener al tren. Sin embargo, la estructura correspondiente al modelo 5.b logra frenar el tren en un tiempo menor, lo que quiere decir que las aceleraciones son mayores y que los pliegues que se forman son capaces de absorber más energía. Cuanto mayor sea la energía que es capaz de absorber un pliegue (energía que requiere para deformarse plásticamente), menor es el número de ellos que se formen y, por tanto, menos eficiente es el modelo.

➤ Desplazamiento

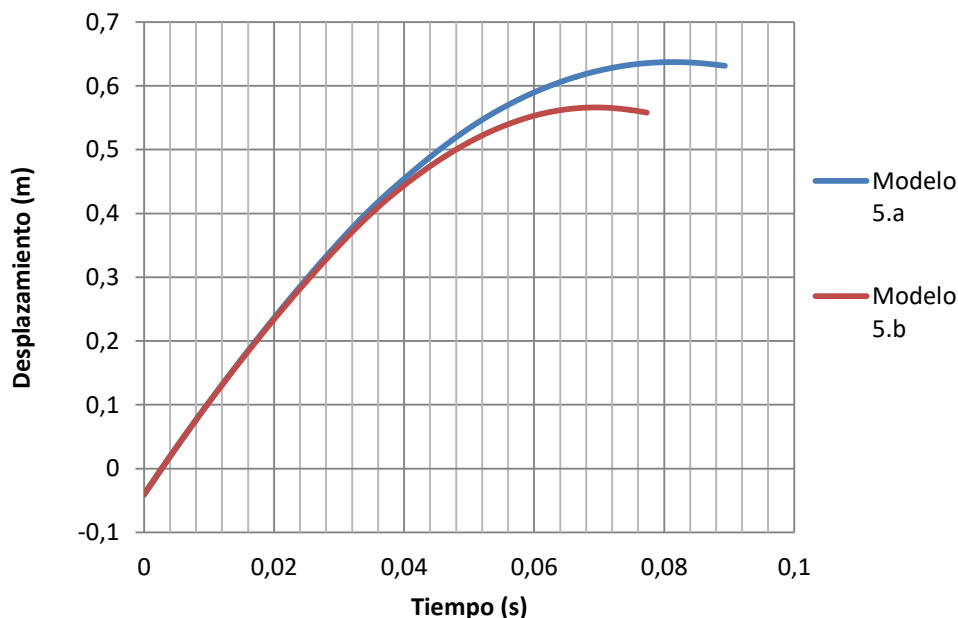


Figura 88. Desplazamiento del tren durante el impacto (modelo 5.a y 5.b)

El desplazamiento máximo se alcanza cuando el tren se detiene. Cuando el tren impacta contra la estructura del modelo 5.a se desplaza un máximo de 0,63 m, mientras que cuando impacta contra el modelo 5.b el tren se desplaza 0,56 m. De acuerdo con el análisis de resultados de la deceleración y la velocidad, estos resultados son lógicos. El modelo 5.b detiene el tren en un menor tiempo y, por tanto, sus pliegues absorben más energía (los picos de aceleración son mayores) de modo que el recorrido que sufre el tren durante el impacto es menor.

➤ Energía

La Figura 89 muestra un comportamiento normal en el proceso de transformación de energía que tiene lugar durante el impacto. Los valores de energía de deformación plástica que adquiere la estructura como consecuencia del plegado de sus elementos son de 95.044 J y 93509 J para los modelos a y b respectivamente.

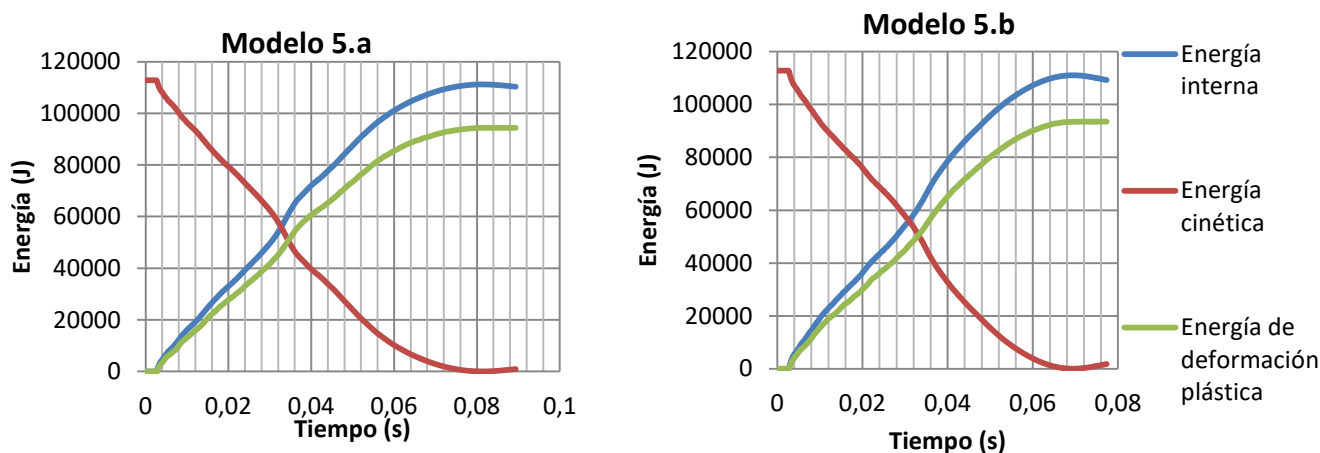


Figura 89. Energía del sistema en función del tiempo (modelo 5.a y 5.b)

### 4.6.3 Conclusiones

El uso de secciones de elementos multicelda no ha mejorado el valor de desaceleración inicial de los elementos de celda única. Esto se debe a que los elementos que presentan varias celdas tienen gran capacidad de absorción de energía.

Hay que aclarar que la energía absorbida por todos los modelos es prácticamente igual, lo que cambia es el tiempo y el modo en el que se produce dicha absorción. En el caso de las secciones multicelda se forman pocos pliegues como consecuencia del impacto, ya que cada pliegue requiere de una gran cantidad de energía para deformarse plásticamente. Por lo tanto, tras el impacto, el tiempo que emplean estas estructuras para la detención del tren es mucho menor que para los modelos anteriores.

Además, cabe destacar que, para el caso de estos modelos, el valor de los espesores se ha reducido considerablemente comparado con los modelos anteriores. Es decir, si se hubiesen seleccionado los mismos espesores las deceleraciones hubiesen sido aún mayores de las obtenidas.

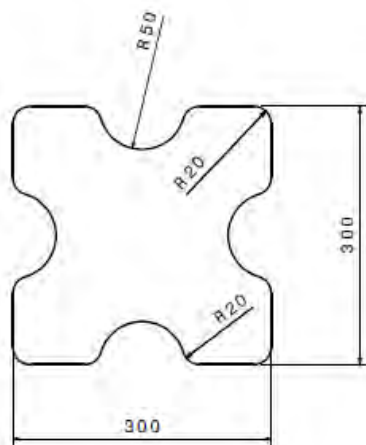


## 4.7 Modelo 6

Tras haber analizado las secciones multicelda y no haber obtenido mejoras en el valor de pico de fuerza inicial respecto de los modelos analizados anteriormente, se procede con el análisis de un elemento sobre el cuál se crean puntos fusibles. Estos son variaciones en la geometría que pretenden facilitar el plegado de los elementos, de modo que se puedan producir un mayor número de pliegues y por tanto reducir los picos de desaceleración del proceso.

En caso de que los resultados obtenidos sean positivos, posteriormente, y para reducir en mayor medida los picos de desaceleración del sistema, se dividiría en dos partes el elemento de absorción de energía presente en la topera, de modo que cada una de las partes presente un espesor diferente. El empleo de diferentes resistencias posibilita un plegado secuencial y reduce la fuerza del impacto inicial.

El modelo que se analiza es aquel cuyos elementos de absorción de energía (parte 2 y 3) presentan la siguiente sección:



**Figura 90. Sección elementos de absorción de energía (modelo 6.a)**

Con esta geometría se pretende evitar las aristas vivas y posibilitar un mejor plegado respecto de las secciones de única celda anteriormente analizadas.

### 4.7.1 Modelo 6.a

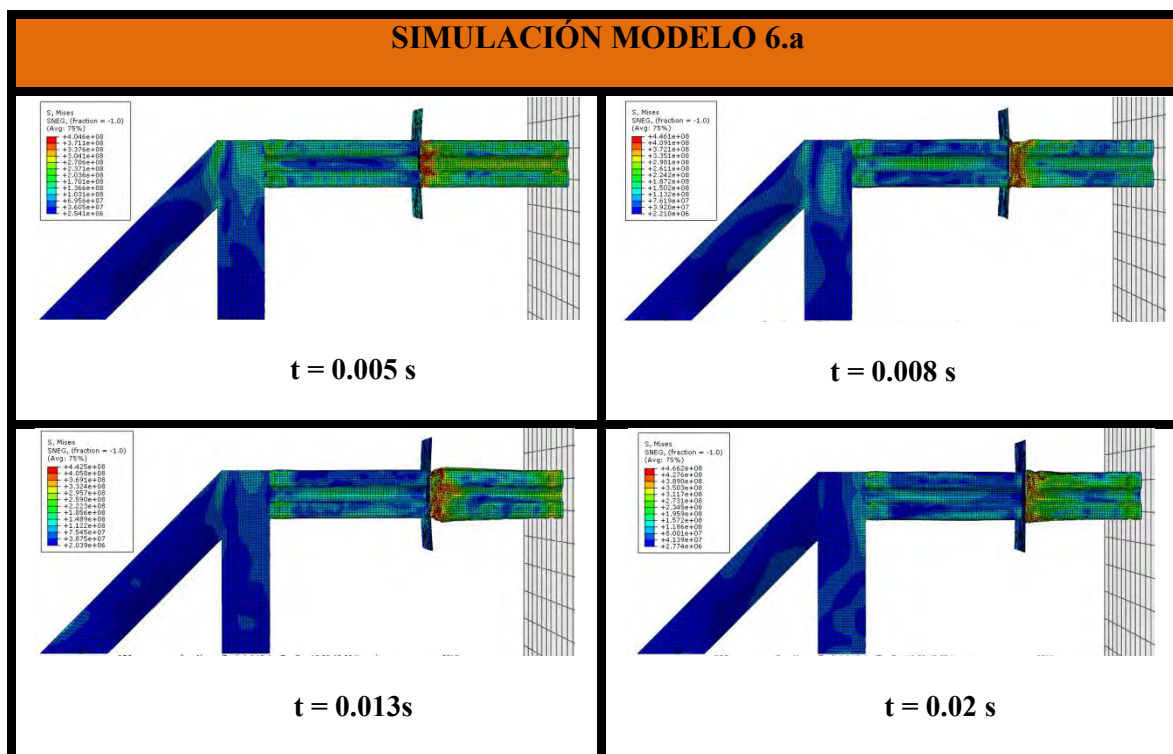
El espesor de los diferentes elementos se elige en base a los resultados obtenidos en los anteriores modelos y en función de la deformación de la estructura tras el impacto.

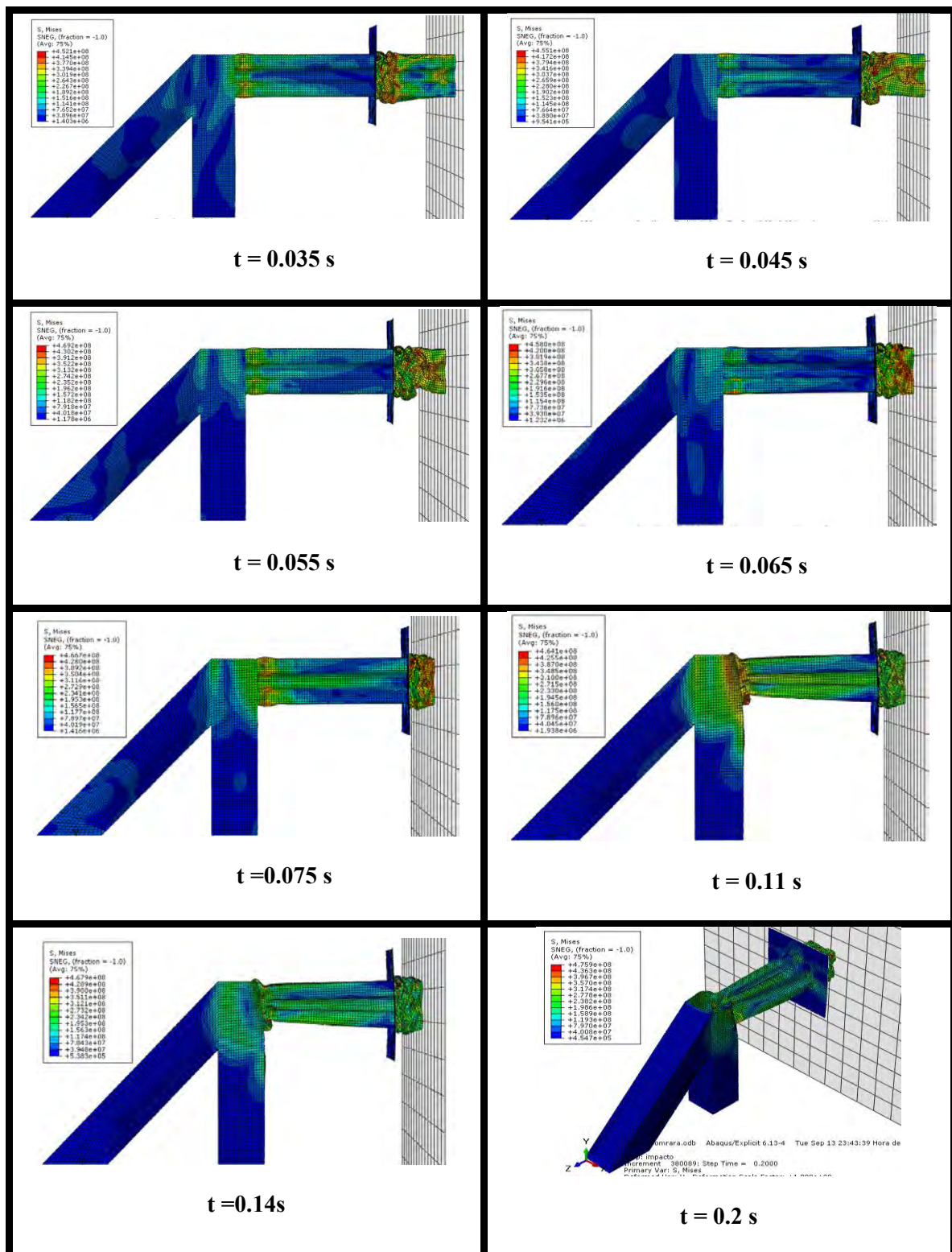
	Parte 1	Parte 2- Tubo horizontal	Parte 2- Placa Plana	Parte 3
Espesor (mm)	9	1,8	9	1,2

Tabla 11. Definición espesores modelo 6.a

Las longitudes de los elementos son las mismas que en el modelo 2.b (Tabla 7) aunque hay que puntualizar que se ha cambiado el elemento placa (Figura 74).

#### 4.7.1.1 Simulación





**Figura 91. Proceso de deformación del modelo 6.a en función del tiempo**

#### 4.7.1.2 Parámetros característicos

➤ Aceleración

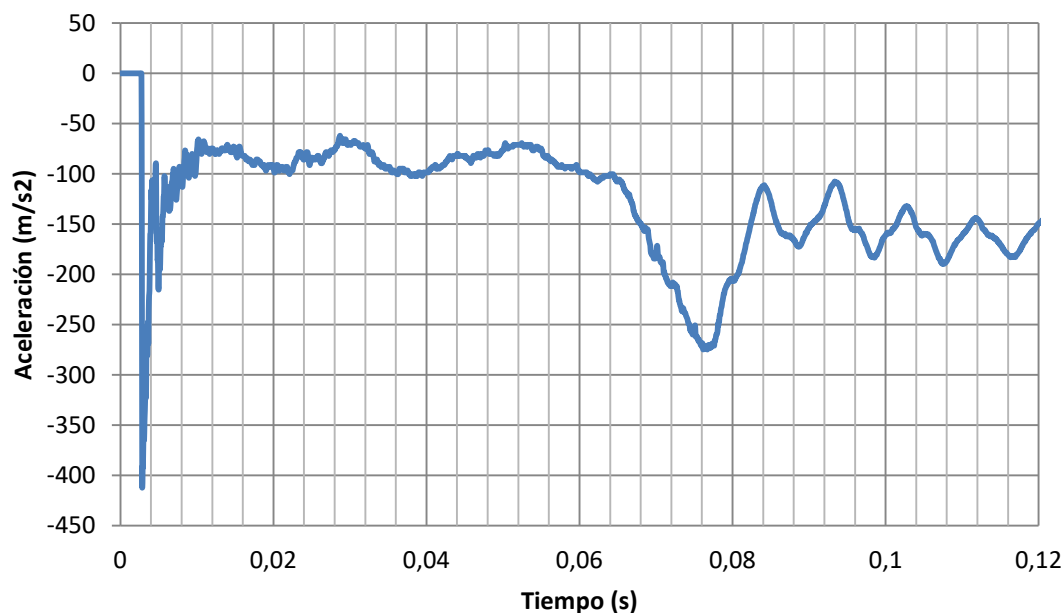


Figura 92. Evolución de la aceleración del tren durante el impacto (modelo 6.a)

La Figura 92 muestra la deceleración sufrida por el tren al impactar con la estructura del modelo 6.a. Esta presenta un pico inicial, consecuencia de las condiciones de contacto y del primer pliegue del elemento que lleva el tren, cuyo valor es de  $-410 \text{ m/s}^2$ . La continuación de pequeños picos muestra el proceso de plegado del elemento del tren hasta que en el instante  $t \approx 0,075 \text{ s}$  comienza el plegado del elemento de la topera, lo que da lugar a un segundo gran pico de deceleración. Posteriormente el plegado continúa hasta la detención total del sistema. Cabe destacar que es la topera, cuyos elementos tienen un mayor espesor, la que genera mayores desaceleraciones durante su proceso de plegado.

➤ Velocidad

La Figura 93 muestra la evolución de la velocidad del tren con el tiempo. En ella se comprueba que la estructura analizada en el modelo es capaz de detener el tren. El tiempo que se emplea para ello es de 0,12 s.

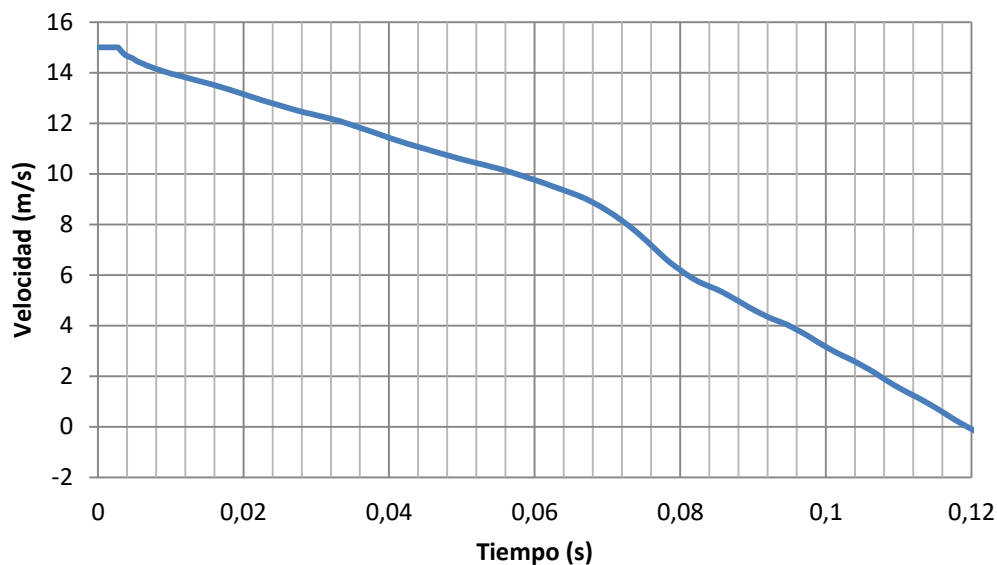


Figura 93. Velocidad en función del tiempo (modelo 6.a)

➤ Desplazamiento

El desplazamiento del tren alcanza un valor máximo cuando este se detiene. La longitud recorrida por el tren durante el impacto es igual a 0,99 m.

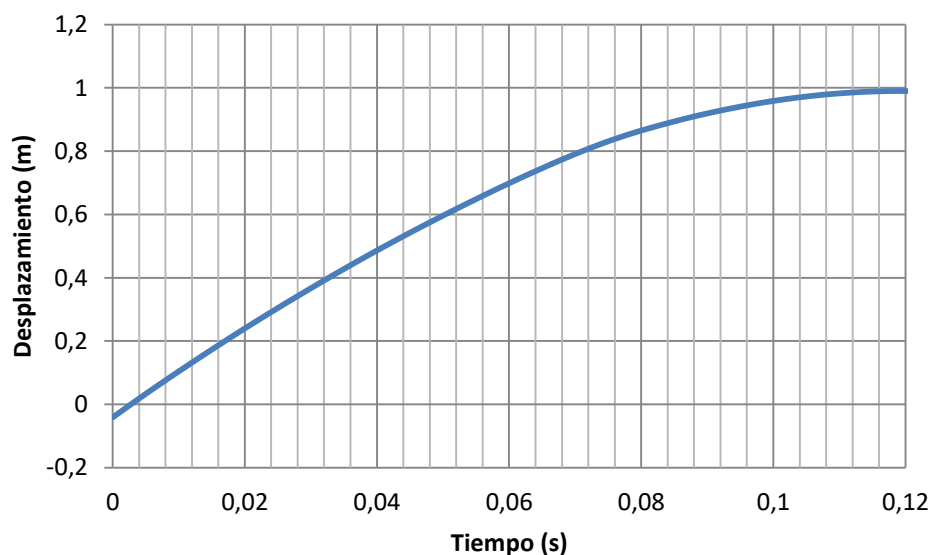
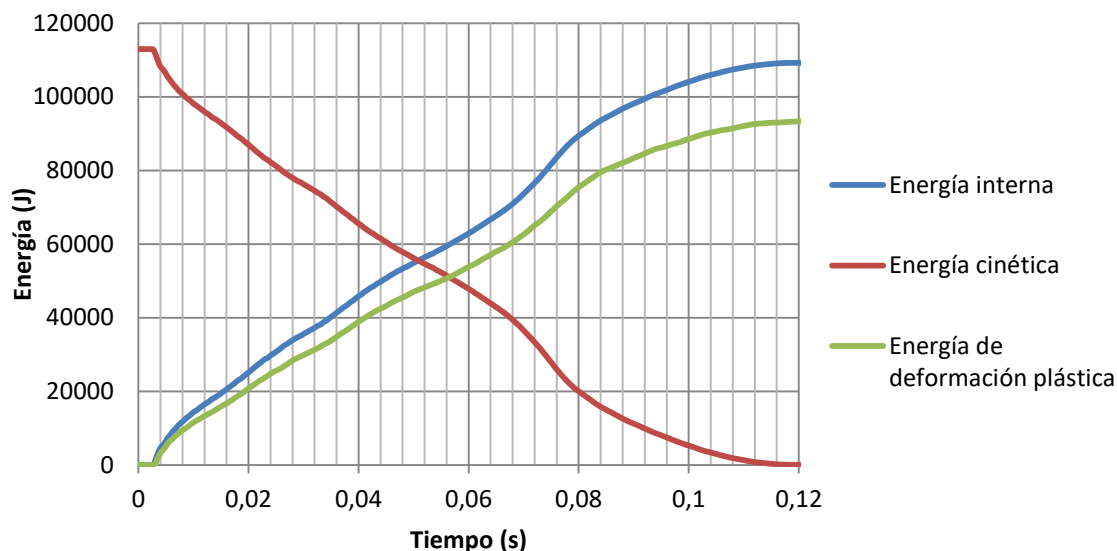


Figura 94. Desplazamiento del tren durante el impacto (modelo 6.a)

➤ Energía

**Figura 95. Energía del sistema en función del tiempo (modelo 6.a)**

La transformación de energía cinética en energía de deformación plástica (principalmente) se lleva a cabo de forma similar a los modelos analizados anteriormente. Sus valores van en línea con los pliegues que se forman en los. Para esta estructura, la cantidad de energía cinética que se transforma en energía de deformación permanente tiene un valor de 93.666 J.

#### 4.7.1.3 Conclusiones

La estructura del modelo 6.a tiene como inconveniente el modo de plegado del elemento de absorción de energía de la topera (parte 2). Como se puede comprobar a través de la simulación, en la zona de contacto entre este elemento y el elemento vertical (parte 1) hay una gran concentración de tensiones y además el elemento no consigue plegarse de forma óptima. Aun así, los resultados obtenidos muestran que los valores de desaceleración que se producen son bajos comparados con los demás modelos, a excepción del modelo 3.b (sección circular).



#### 4.7.2 Modelo 6.b

Dado que los valores obtenidos de los parámetros característicos para la geometría ensayada en el modelo 6.a son bastante positivos, se va a proceder a optimizar aún más dicho modelo. Para ello se llevan a cabo tres modificaciones:

- El elemento de absorción de energía que está en la topera (parte 2) se va a subdividir en dos elementos con diferentes espesores.
- La longitud de las partes 2 y 3 se ajusta de modo que se aproveche la totalidad del material. Con esto se consigue una reducción del peso y un mejor plegado.
- El espesor de los elementos de la parte 1 aumenta para posibilitar un mejor plegado de los elementos de la parte 2.

Para definir la geometría de la estructura se muestra la siguiente imagen:

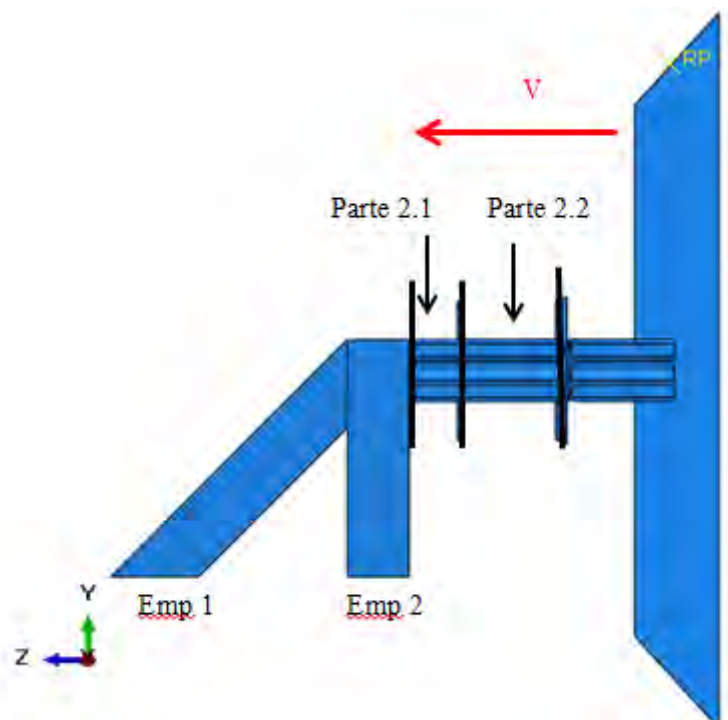


Figura 96. Zonas específicas topera modelo 6.b



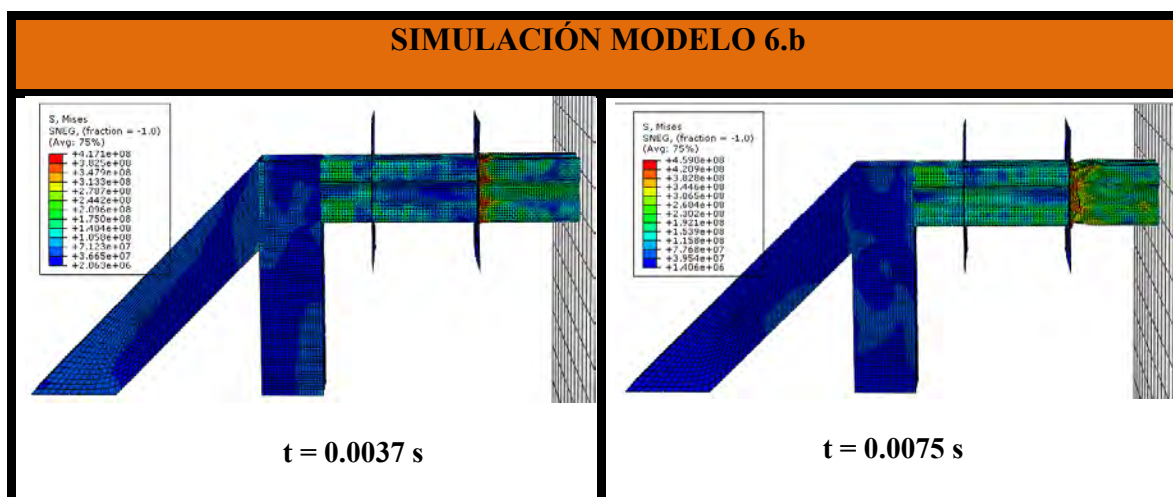
Para definir la geometría de este modelo basta con establecer las medidas de los elementos que hacen referencia a la parte 2 y 3, ya que los demás elementos tienen las dimensiones presentadas en la Tabla 7 a excepción de la placa que se modificó posteriormente (Figura 74).

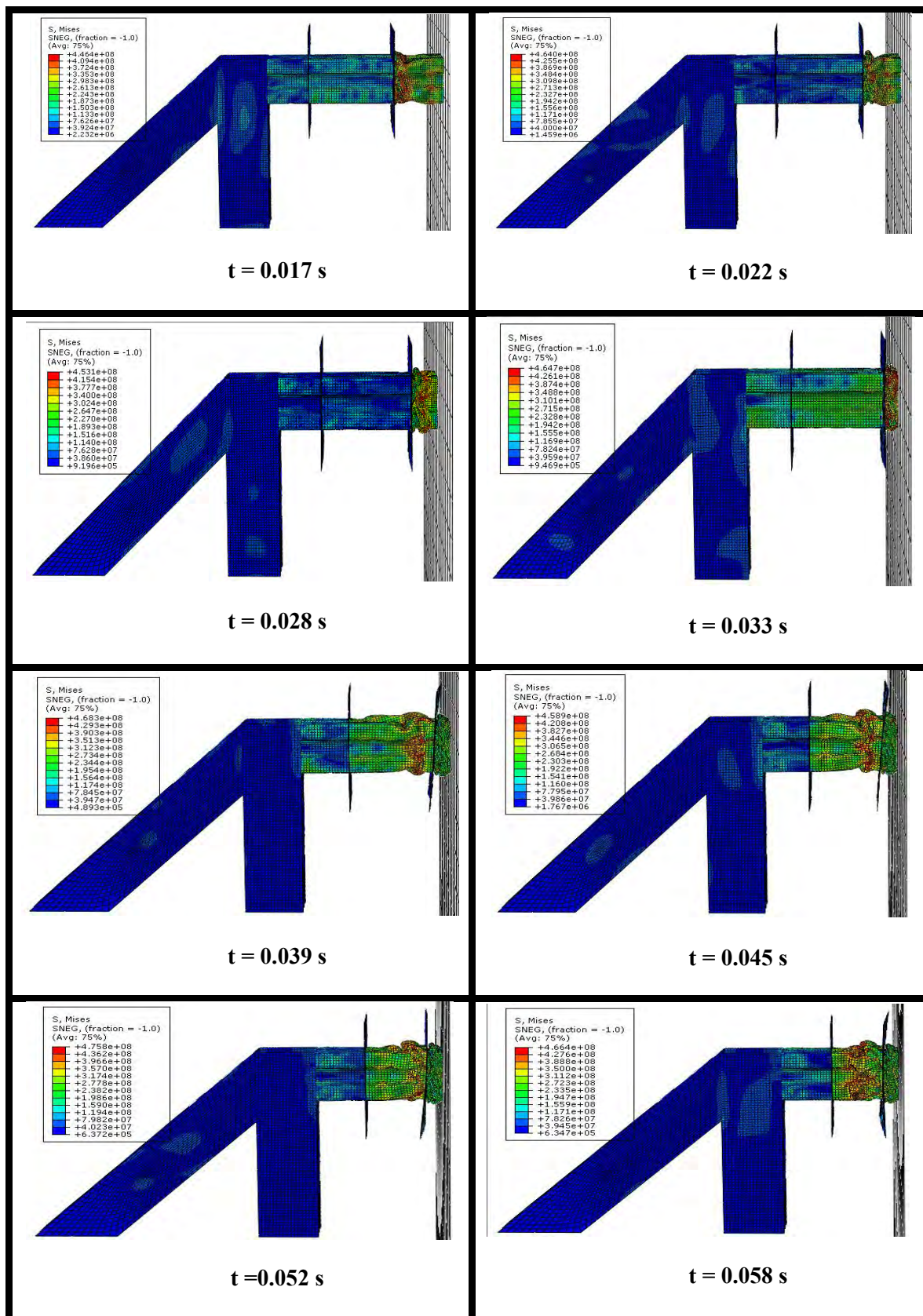
	2.1- Elemento que absorbe energía en topera	2.2- Elemento que absorbe energía en topera	3 – Elemento que absorbe energía del tren
Longitud (m)	0,25	0,5	0,5

Tabla 12. Definición longitudes parte 2 y 3 del modelo 6.b

Además se deben definir cada uno de los espesores que se han seleccionado. El valor que se presenta surge como resultado de un análisis de la misma geometría con varios espesores diferentes, de modo que se toman aquellos cuyos resultados presentan un menor valor de la deceleración del tren.

#### 4.7.2.1 Simulación







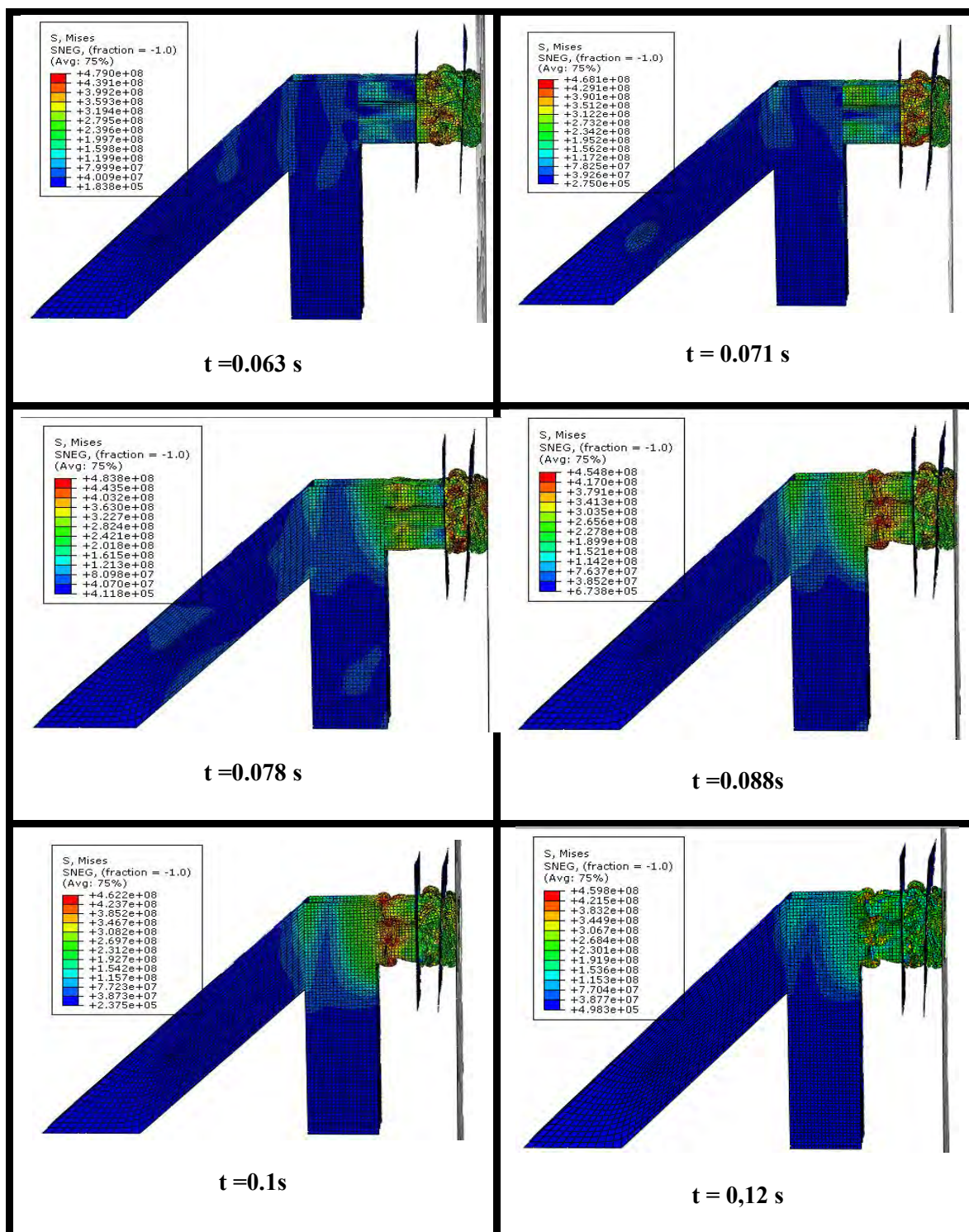
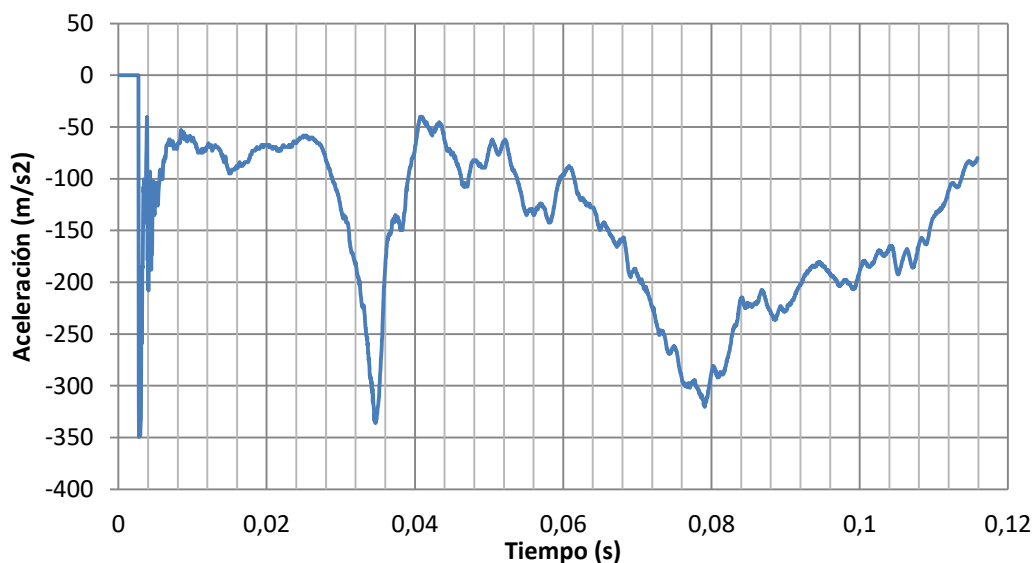


Figura 97. Proceso de deformación del Modelo 6.b en función del tiempo

#### 4.7.2.2 Parámetros característicos

A continuación se muestran los parámetros característicos más importantes del proceso e impacto

➤ Aceleración

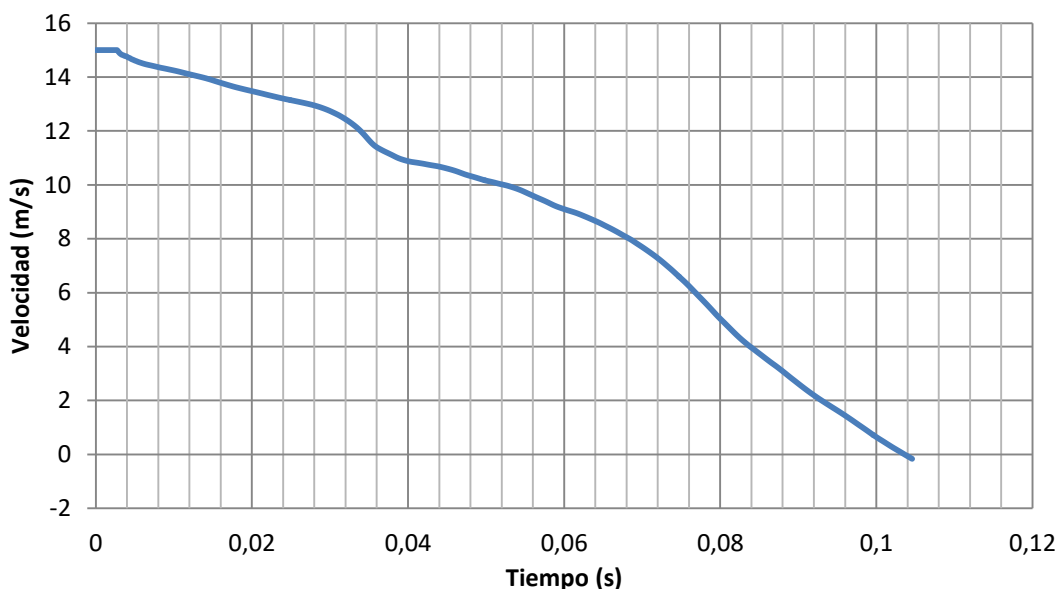


**Figura 98.** Evolución de la aceleración del tren durante el impacto (modelo 6.b)

La Figura 98 muestra la evolución de la deceleración del tren al impactar contra la estructura analizada. Se pueden observar claramente tres picos que se corresponden con el inicio de plegado de cada una de las zonas que presentan diferentes espesores. Estos picos alcanzan valores muy próximos en cuanto a deceleración, siendo el valor más alto el del pico inicial con un valor igual a  $-350 \text{ m/s}^2$ . Al igual que en los modelos anteriores el proceso de plegado de un mismo elemento se muestra por la sucesión de pequeños picos que se muestran en la gráfica.

Los resultados en cuanto a deceleración y, por tanto, en lo que respecta a la fuerza que se transmite sobre los pasajeros, son los mejores obtenidos hasta el momento. El valor pico inicial de deceleración es el más bajo y además, ninguno de los otros picos elevados supera el valor inicial, por lo que, finalmente, esta es la estructura que se va a seleccionar como la más óptima.

➤ Velocidad

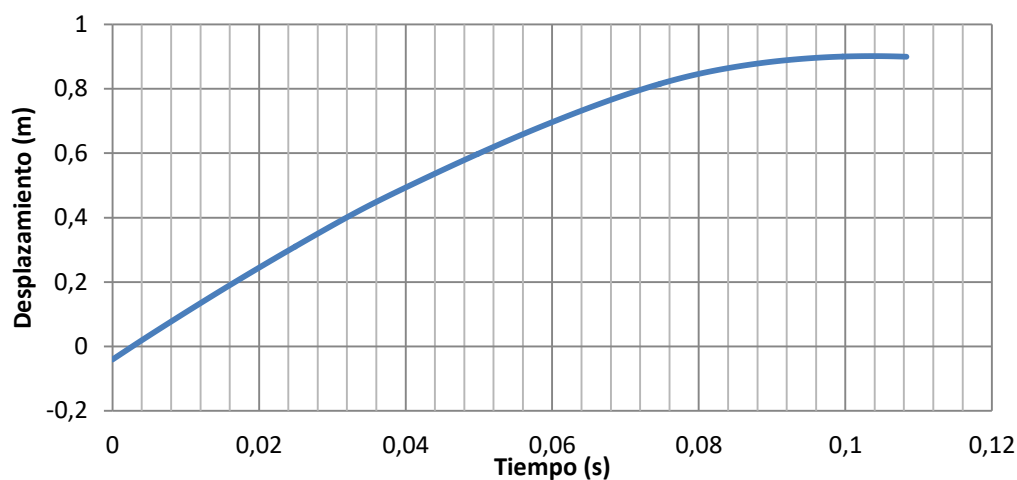


**Figura 99. Velocidad en función del tiempo (modelo 6.b)**

La Figura 99 muestra cómo se reduce la velocidad del tren. Se pueden observar tres pendientes de velocidad diferentes, que se corresponden con el plegado de cada uno de los elementos diferentes. Durante el plegado del primer elemento la reducción de la velocidad es pequeña. En el segundo plegado esta reducción de la velocidad es mayor que en el primer caso pero menor que la reducción de velocidad que se produce a consecuencia del tercer plegado. Finalmente se comprueba que el tren logra detenerse en un tiempo posterior al impacto igual a 0,1s.

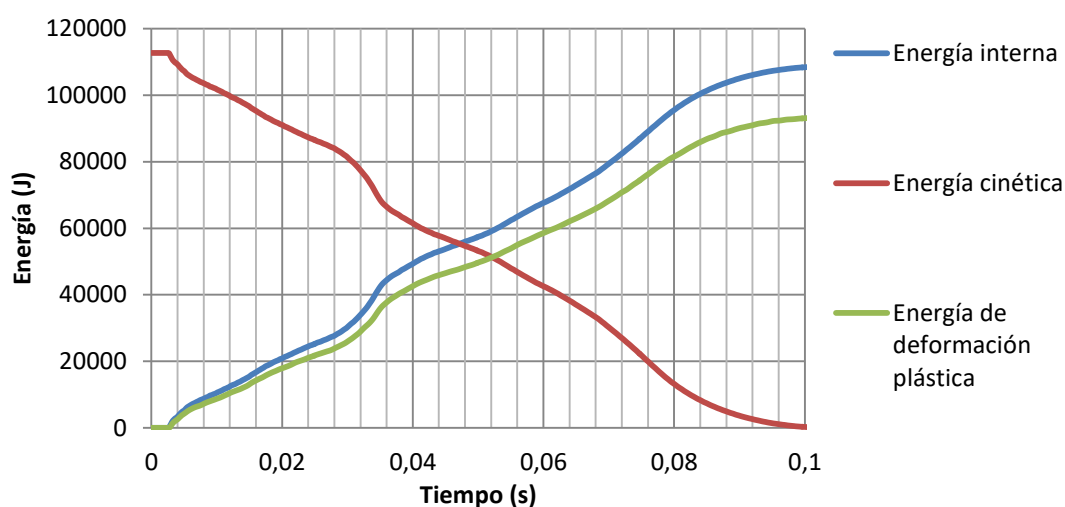
➤ Desplazamiento

La Figura 100 muestra cómo evoluciona el desplazamiento del tren durante el impacto contra la topera. En el comienzo del impacto, el desplazamiento muestra una tendencia ascendente que se va reduciendo con el sucesivo plegado de los elementos y por tanto la reducción de la velocidad del tren. El tren recorre una longitud máxima de el tren se va reduciendo hasta alcanzar un valor máximo igual a 0,9 m.



**Figura 100. Desplazamiento del tren durante el impacto (modelo 6.b)**

➤ Energía



**Figura 101. Energía del sistema en función del tiempo (modelo 6.b)**

La Figura 101 muestra la transformación de energía cinética en energía de deformación plástica por parte del sistema de absorción de energía. Las curvas son inversamente proporcionales y, como se comentó anteriormente, la diferencia entre los valores de energía de deformación plástica y la energía interna se deben a la componente elástica del sistema.

Si se observa la evolución de los valores de energía de deformación plástica se ven tres escalones los cuales muestran el inicio de plegado de cada uno de los elementos de diferentes espesores. La energía de deformación plástica adquiere un valor máximo cuando se detiene el tren que es igual a 94.455 J.

➤ Reacciones en el empotramiento

Dado que finalmente se elige esta estructura como la más óptima para el estudio analizado, a continuación, se presentan las reacciones (momentos y fuerzas) de los empotramientos (Véase Figura 96), de modo que se observen las fuerzas que deben soportar los elementos que están empotrados al suelo.

- Reacción de fuerzas.

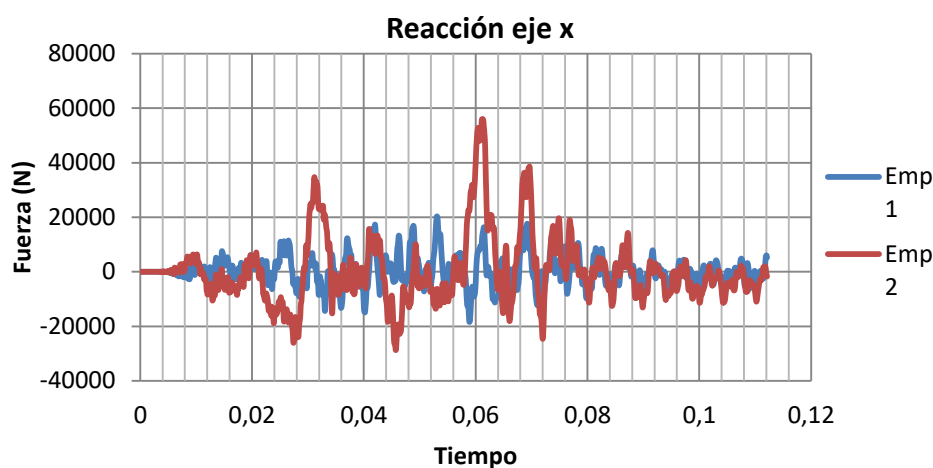
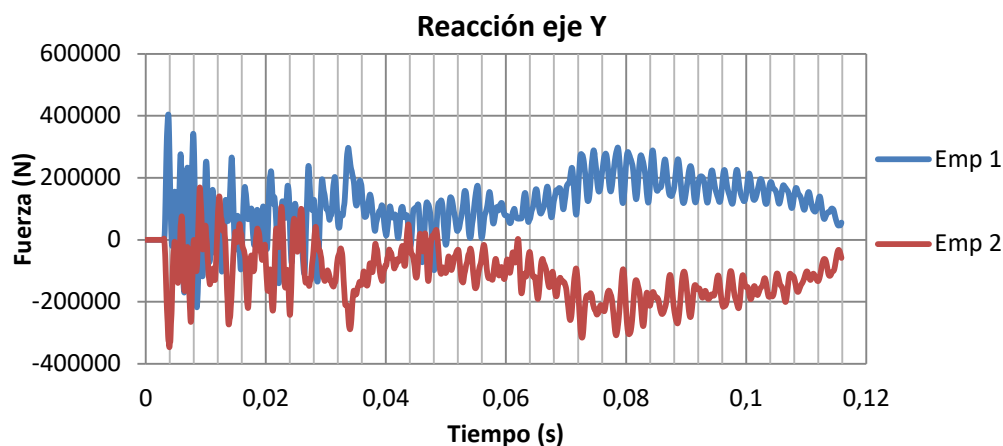


Figura 102. Reacción eje X de los empotramientos (modelo 6.b)

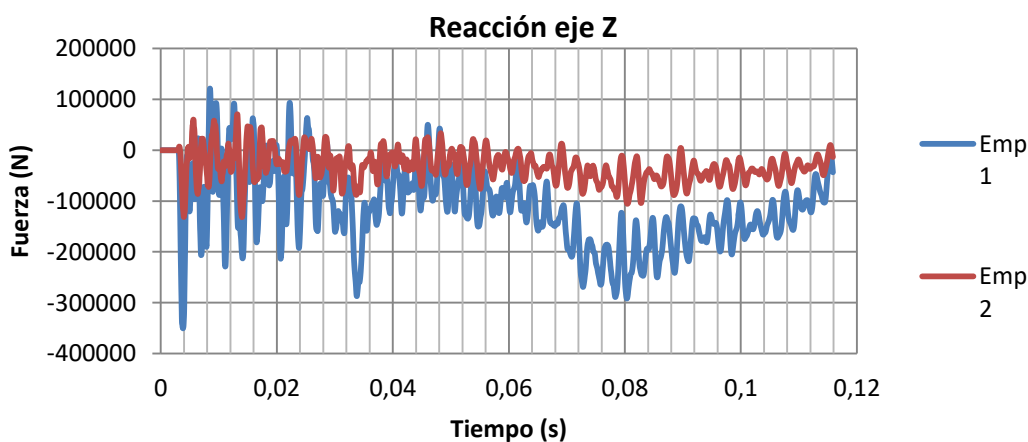
Se observa en Figura 102 que el empotramiento 2 absorbe más fuerza en la dirección del eje x. Los valores fluctúan debido a la formación de pliegues, siendo los valores pequeños.





**Figura 103. Reacción eje Y de los empotramientos (modelo 6.b)**

La Figura 103 muestra la fuerza de reacción en el eje Y para ambos empotramientos. Se observa que los valores que adquieren ambos son contrarios y, por tanto, compensan las fuerzas sobre este eje.



**Figura 104. Reacción eje Z de los empotramientos (modelo 6.b)**

La Figura 104 muestra la evolución de la fuerza en los empotramientos en la dirección de impacto. Esta es la gráfica de reacciones más significativa. Se puede apreciar que su evolución es prácticamente igual que la evolución de la aceleración. Teniendo en cuenta que la fuerza que se genera sobre el tren consecuencia de la desaceleración es, según la segunda Ley de Newton, igual a la multiplicación de la

aceleración por la masa, la evolución de la fuerza sigue el mismo camino que el de la aceleración, ya que la masa se considera constante.

Por lo tanto, la suma de las reacciones en ambos empotramientos en el eje Z tiene que ser similar a la fuerza que se genera sobre el tren. Las diferencias entre ambos están originadas porque se trata de un evento dinámico en el que se introducen vibraciones y demás fenómenos estudiados anteriormente. Si se comparan la Figura 104 y Figura 98 se comprueba que ambas son prácticamente iguales.

- Reacción de momentos.

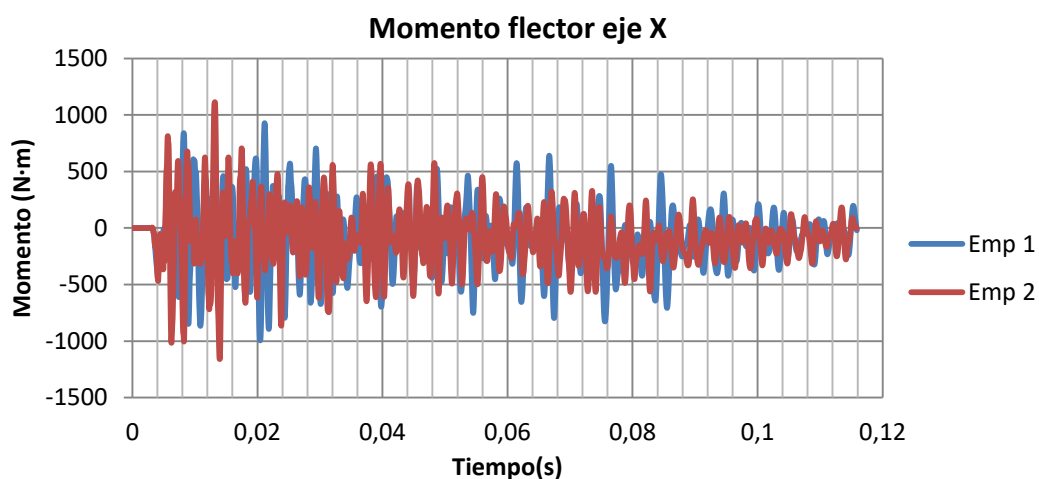


Figura 105. Reacción momento flector eje X de los empotramientos (modelo 6.b)

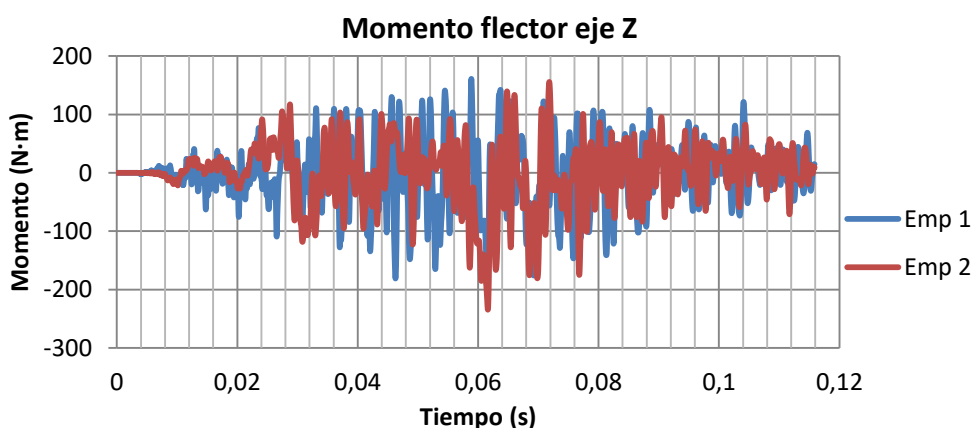
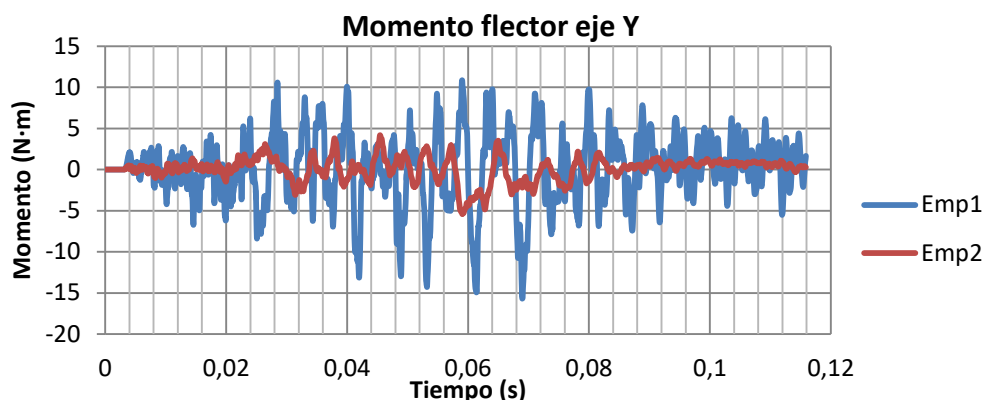


Figura 106. Reacción momento flector eje Z de los empotramientos (modelo 6.b)



**Figura 107.** Reacción momento flector eje Y de los empotramientos (modelo 6.b)

Como se puede comprobar en la Figura 105, Figura 106 y Figura 107 los momentos flectores en los empotramientos tienen valores bajos, siendo más significativo el momento flector del eje X, puesto que la fuerza de impacto sucede sobre el eje Z y la distancia entre esta fuerza y el empotramiento se mide sobre el eje Y.

Estas gráficas dan una idea acerca de cómo se retuerce la estructura a consecuencia del impacto.

#### 4.7.2.3 Conclusiones

La introducción de una sección que evita las aristas vivas y unos elementos que poseen diferentes espesores ha posibilitado un plegado más eficiente de la estructura. Además el uso de diferentes longitudes permite que se emplee todo el recorrido de los elementos de absorción de energía de modo que se reduce el peso respecto al uso de longitudes mayores.

El criterio de selección principal es el máximo valor en la desaceleración que sufre el tren ya que este será proporcional a la fuerza que se transmite sobre los pasajeros. Esta fuerza que alcanza su mayor valor en el inicio del proceso establece el límite de tolerancia humana. Por lo tanto, como el modelo 6.b es el que presenta el valor más bajo de todos los modelos analizados, este se selecciona como el modelo más óptimo de topera ferroviaria.

## 4.8 Tabla resumen principales características de los diferentes modelos

Finalmente, se presenta una tabla que resume las características más importantes de todos los modelos analizados.

	<b>Aceleración Máxima (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>Aceleración Promedio (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>Tiempo de Detención (s)</b>	<b>Energía de Def. Plástica (J)</b>	<b>Masa Topera (kg)</b>	<b>Masa elemento tren (kg)</b>
<b>Modelo 1.b</b>	- 850	-144,5	0,1	99715	68,09	9,72
<b>Modelo 1.c</b>	- 605	- 115,3	0,128	96006	57,83	6,48
<b>Modelo 2.a</b>	- 627	- 108,2	0,138	95721	115,60	6,48
<b>Modelo 2.b</b>	- 602	- 101,7	0,147	95943	106,76	6,48
<b>Modelo 3.a</b>	- 614	- 161,3	0,092	94441	85,35	3,24
<b>Modelo 3.b</b>	- 758	- 128,77	0,116	95102	163,40	10,80
<b>Modelo 4.a</b>	- 500	- 93,97	0,16	97211	92,22	5,18
<b>Modelo 4.b</b>	- 390	- 78,5	0,187	98648	89,21	3,31
<b>Modelo 5.a</b>	- 535	- 184,1	0,081	95044	116,21	2,70
<b>Modelo 5.b</b>	- 546	- 216,6	0,056	93509	115,67	2,50
<b>Modelo 6.a</b>	- 410	-125	0,12	93666	134,21	2,18
<b>Modelo 6.b</b>	- 350	- 144	0,1	93455	131,85	1,81

Tabla 13 Principales características de los diferentes modelos analizados



## *Capítulo 5*

# *CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO*

## 5 Conclusiones y trabajos futuros

### 5.1 Conclusiones

Los elementos de absorción de energía presentes en los medios de transporte son de relevante importancia. El empleo de estructuras que sean capaces de deformarse plásticamente absorbiendo la energía a consecuencia del impacto, posibilita un aumento en probabilidades de supervivencia de los pasajeros.

Por este motivo, en el presente trabajo se ha llevado a cabo un análisis de distintos modelos de toperas ferroviarias (sistemas de seguridad pasiva) y elementos de absorción de energía que lleva el tren con el objetivo de optimizarlos en la medida de lo posible. El criterio de selección final del modelo se establece en función de las desaceleraciones que se producen como consecuencia del impacto. Estas deceleraciones muestran la fuerza que se transmite sobre el habitáculo de seguridad donde se sitúan los pasajeros.

Una vez realizado el estudio numérico del comportamiento frente a impacto de los diferentes modelos de topera analizados durante el capítulo 4 las conclusiones generales que se obtienen son las siguientes:

- Los resultados obtenidos para un modelo dependen de la malla empleada, por lo que resulta necesario realizar un análisis de sensibilidad de la malla para considerar como válidos los resultados obtenidos.
- La energía cinética inicial es proporcional a la masa y al cuadrado de la velocidad. Dado que la masa (masa constante del tren + masa variable del elemento de absorción de energía que se sitúa en el tren) es variable, los valores de la energía cinética también son variables aunque todos muy próximos.
- Los picos de mayor desaceleración se producen en el instante inicial a consecuencia del impacto, las condiciones de contacto, el primer pliegue y a la mitad del proceso con el comienzo del plegado de la estructura de la topera. Los picos que se forman entre ambos (pico inicial y comienzo de pliegue en la



topera) son consecuencia del plegado de los elementos y presentan valores más bajos en comparación con estos picos de aceleración puntuales.

- La elección de los espesores en las diferentes zonas en las que se divide el sistema que se analiza (Figura 45) es de vital importancia para que se produzca un plegado óptimo y se aproveche todo el material disponible.
- Es necesario, y se considera un requisito de diseño, que el elemento de absorción de energía que lleva el tren en su parte delantera presente menor espesor que el elemento de absorción de energía que tiene la topera (parte 2), de modo que se fuerce al elemento que lleva el tren a plegarse en primer lugar.
- Es necesario, y se considera un requisito de diseño, que los elementos de la topera que van empotrados en el suelo (parte 1) posean un espesor bastante mayor al de los demás elementos, ya que estos son los que posibilitan la compresión y el plegado de los elementos que se diseñan para absorber la energía (parte 2 y 3).
- La elección en la geometría de la parte 1, que hace referencia a aquellos elementos que están empotrados al suelo, es muy importante. En los modelos 1.a y 1.b se utiliza un único elemento. La estructura del modelo 1.a es débil si se produce una fuerza elevada, puesto que el elemento tiende a doblarse. La estructura del modelo 1.b también presenta la debilidad de que si se produce una fuerza elevada el elemento tiende a abrirse. Por estos motivos, se decide añadir un elemento oblicuo, el cual está también empotrado sobre el suelo, a la estructura del modelo 1.a. Con este se consigue aumentar la robustez de esta zona, de modo que en caso de una fuerza elevada, esta es absorbida por los dos empotramientos. Además, con la incorporación de este elemento se evita en gran medida que la parte 1 de la topera tienda a doblarse por el impacto.
- Para una misma estructura, las deceleraciones que se producen son más elevadas cuanto mayor es el espesor de los elementos que la forman, de modo que la reducción de este parámetro geométrico posibilita una mejora en los resultados. Sin embargo, si se reduce demasiado el espesor, se puede producir un mal

plegado de los elementos y, por tanto, el colapso de la estructura, de modo que el tren no se detiene.

- A medida que aumenta el tamaño de los elementos, para un mismo tipo geométrico de sección, las fuerzas que se transmiten sobre el tren también aumentan. Esto se debe a que el plegado de estos elementos requiere de mayor energía y, por tanto, en cada plegado las desaceleraciones producidas son mayores.
- La longitud de los elementos de la topera es variable en función de la sección que se analice. A la vista de las simulaciones y teniendo en cuenta el modo de plegado se seleccionan unas longitudes u otras para evitar en la medida de lo posible que se produzca el pandeo de la estructura y, consecuentemente, la pérdida de capacidad de disipación energética.
- El cambio de la placa utilizada en los primeros modelos (
- Tabla 3) por una placa plana (Figura 74) evita los dos picos iniciales de desaceleración, de modo que únicamente se produce un pico inicial.
- El comportamiento que presentan las secciones de celda única muestran una mejor respuesta para el elemento de sección circular respecto al de sección cuadrada, ya que las aceleraciones iniciales y las del proceso total son menores.
- El análisis de elementos con sección multicelda muestra que estos elementos son capaces de absorber más energía en cada plegado que se produce de los elementos. Es necesario, por tanto, reducir los espesores en mayor medida que la sección de celda única para reducir las deceleraciones que se producen. Aun así, no se consigue mejorar los resultados con este tipo de sección.
- La creación de puntos fusibles en los elementos mejora el comportamiento de plegado de la estructura. En este caso se han creado redondeos en las esquinas para evitar las aristas vivas y unas consideraciones locales sobre la sección que permite un mejor plegado y una reducción en el pico inicial de fuerza producido.

- El uso de un elemento que presente zonas con diferentes espesores posibilita un plegado más eficiente de la estructura y permite reducir los picos de fuerza que se originan a causa de las desaceleraciones.

## **5.2 Trabajos futuros**

Con el objetivo de complementar y mejorar el comportamiento de los elementos estructurales estudiados en el presente proyecto, se propone continuar la investigación de los mismos a través de las siguientes líneas de trabajos futuros:

- Importancia de las condiciones de contorno impuestas por el problema. Influencia de la velocidad y masa del tren, altura de impacto y empotramiento sobre el suelo en la forma de plegado de los elementos.
- Búsqueda de las mejores relaciones de longitud, área y espesor para cada tipo de sección, de forma que se evite el pandeo y, por tanto, un plegado ineficiente.
- Estudio de estructuras de panal (*Honeycomb*) y estructuras tipo sándwich, para elementos de absorción de energía.
- Estudio de comportamiento de elementos tubulares rellenos con espumas poliméricas y metálicas.
- Estudio de la importancia que tiene el material seleccionado para los elementos. Se propone utilizar otro tipo de materiales, tales como materiales compuestos.
- Estudio de la ecuación constitutiva empleada en este análisis. Se propone el uso de otros criterios de fallo y su comparación.
- Estudio de nuevas toperas que permitan absorber energía en caso de que se produzca un impacto que no sea puramente axial.



## *Capítulo 6*

***REFERENCIAS***

***BIBLIOGRÁFICAS***

## 6 Referencias bibliográficas

- [1] J.M. Goicolea, “Estructuras sometidas a impacto” E.T.S. Ingenieros de Caminos, Universidad Politécnica Madrid.[En línea]. Disponible en:  
<http://w3.mecanica.upm.es/~goico/ead2000.pdf>
- [2] “End-stop series,” Oleo International documents. [En línea] Disponible en:  
[https://www.oleo.co.uk/media/media\\_uploads/End-Stops-series-brochure-ES.pdf](https://www.oleo.co.uk/media/media_uploads/End-Stops-series-brochure-ES.pdf)
- [3] M. Priante and E. Martínez,” Crash energy management crush zone designs: features, functions, and forms” in *ASME/IEEE Joint Rail Conference & Internal Combustion Engine Spring Technical Conference*, March 13-16, 2007, Pueblo, Colorado, USA. [En línea]. Disponible en :  
[http://ntl.bts.gov/lib/43000/43000/43064/Priante\\_crash\\_energy.pdf](http://ntl.bts.gov/lib/43000/43000/43064/Priante_crash_energy.pdf)
- [4] T.Mochida, T.Yamaguchi, T.Kawasaki and T.Miyamoto “Development of Crashworthy Structure Composed of Aluminium Alloys for High-speed Railway Vehicle”. [En línea]. Disponible en :  
[http://www.uic.org/cdrom/2008/11\\_wcrr2008/pdf/R.2.4.1.2.pdf](http://www.uic.org/cdrom/2008/11_wcrr2008/pdf/R.2.4.1.2.pdf)
- [5] “Railway Safety Performance in the European Union 2014” European Railway Agency, 2014. [En línea]. Disponible en : <http://www.era.europa.eu/Document-Register/Documents/SPR2014.pdf>
- [6] M.J.Marcos Montero, “Accidentes ferroviarios en España (orden de gravedad)”, Edición 01. Junio 2015. [En línea]. Disponible en:  
[http://www.fcmaf.es/Publicaciones/Accidentes\\_Ferrovios\\_\(gravedad\).pdf](http://www.fcmaf.es/Publicaciones/Accidentes_Ferrovios_(gravedad).pdf)
- [7] “Medio centenar de muertos en un accidente ferroviario en Argentina” El País, 22 de Febrero, 2012. [En línea]. Disponible en:  
<http://internacional.elpais.com/internacional/2012/02/22/actualidad/1329921646764629.html>



- [8] W. D. Callister, Jr. "Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales". Ed Reverté, 2000.
- [9] "Comportamiento Mecánico de los materiales" Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Universidad Carlos III de Madrid, 2015.
- [10] "Plasticidad," Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Universidad Carlos III de Madrid, 2015.
- [11] P. Du Bois [et al], *Vehicule Crashworthiness and occupant protection*, P.Prasad and J.E.Belwafa (Eds).American Iron Institute, Southfield, Michigan. [En línea]. Disponible en:  
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=8A35A7526C3126C88DDBD663AE9BCF95?doi=10.1.1.208.2312&rep=rep1&type=pdf>
- [12] Z. Ahmad. "Impact and energy absorption of empty and foam filled conical tubes", Diciembre, 2009.[En línea]. Disponible en :  
[http://eprints.qut.edu.au/31908/1/Zaini\\_Ahmad\\_Thesis.pdf](http://eprints.qut.edu.au/31908/1/Zaini_Ahmad_Thesis.pdf)
- [13] H.Kamel Ibrahim, "Design Optimization of vehicle Structures for Crashworthiness improvement" Thesis in the Department of Mechanical and Industrial Engineering at Concordia University, August 2009. [En línea]. Disponible en :  
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.632.6173&rep=rep1&type=pdf>
- [14] M.Pereira, "Structural Crashworthiness of railway vehicles" Department of Mechanical Engineering, Instituto Superior Técnico, Technical University of Lisbon. [En línea]. Disponible en :  
<http://www.uic.org/cdrom/2006/wcrr2006/pdf/183.pdf>
- [15] CESVI, "Deformaciones Programadas," No.3, Mayo 2009. [En línea]. Disponible en :<http://docplayer.es/4720615-1-prueba-de-impacto-delantero.html>



- [16] “Rail Brochure,” Oleo International documents. [En línea]. Disponible en :  
[https://www.oleo.co.uk/media/media\\_uploads/Rail-series-brochure-ES.pdf](https://www.oleo.co.uk/media/media_uploads/Rail-series-brochure-ES.pdf)
- [17] X.Xue and F.Schimd, “Crashworthiness of conventionally designed railway coaching stock and structural modifications for enhanced performance” in *5th European LS-DYNA Users Conference*, Birmangham, UK, 2005. [En línea]. Disponible en :  
[http://www.dynalook.com/european-conf-2005/copy\\_of\\_Xue.pdf](http://www.dynalook.com/european-conf-2005/copy_of_Xue.pdf)
- [18] J.S.Montes.Hernandez, “La jaula que nos protege”, CESVI. [En línea]. Disponible en:  
[https://www.fundacionmapfre.org/documentacion/publico/i18n/catalogo\\_imagenes/grupo.cmd?path=1078711](https://www.fundacionmapfre.org/documentacion/publico/i18n/catalogo_imagenes/grupo.cmd?path=1078711)
- [19] R.Kiran, N.Khandekwal and P.Tripathi, “Collapse Behaviour and Energy Absorption of Aluminium Tubes Filled with Wood Sawdust” in *Journal of Engineering Research and Applications*, vol.5, pp 39-44, October 2015. [En línea]. Disponible en:  
[http://www.ijera.com/papers/Vol5\\_issue10/Part%20-%201/F510013944.pdf](http://www.ijera.com/papers/Vol5_issue10/Part%20-%201/F510013944.pdf)
- [20] J. Marsolek and H.G Reimerdes. “Energy absorption of Metallica cylindrical shells with induced non-axisymmetric folding patterns”. *International Journal of Impact Engineering*, vol.30, pp. 1209-1223, 2004.
- [21] X.Zhan, H. Zhang and Z.Wen, “Axial crushing of tapered circular tubes with graded thickness” in *International Journal of Mechanical Science*, vol.92, pp 12-23, 2015.
- [22] G.Li, F.Xu, G.Sun and Q. Li, “A comparative study on thin-walled structures with functionally graded thickness (FGT) and tapered tubes withstanding oblique impact loading” in *International Journal of Impact Engineering*, vol.77, pp 68-83, 2015.

- [23] M.Emin Erdin, C.Baykasoglu and M.Tunay Cetin, “Quasi-static Axial Crushing Behavior of Thin-walled Circular Aluminum Tubes with Functionally Graded Thickness” in *International Conference on Manufacturing Engineering and Materials*, *Procedia Engineering*, vol.149 ,pp 559-565, 2016. [En línea]. Disponible en:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581631222X>
- [24] C.J.Shen, G.Lu,T.X.Yu and D.Ruan, “Dynamic response of a cellular block with varying cross section” in *International Journal of Impact Engineering*, vol.79, pp 53-64, 2015.
- [25] J. Zhang, Q. Fang, Y. Zhang, J. Liu and Z. Gong, "Mesoscopic investigation of closed-cell aluminum foams on energy absorption capability under impact" *Composite Structures*, vol. 124, pp. 409-420, 2015.
- [26] A.E. Ismail, “Energy Absorption of Foam-Filled Steel Extrusion under Quasi-static Oblique Loading” in *International Journal of Engineering and Technology*, vol.5, p. 11-24,2008.[En línea].Disponible en:  
[http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/30957294/J-2008-V1002.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAJ56TQJRTWSMTNPEA&Expires=1474584084&Signature=V4IoOeTuFjaauG2LReApxKtZg8%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DENERGY\\_ABSORPTION\\_OF\\_FOAM-FILLED\\_STEEL\\_E.pdf](http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/30957294/J-2008-V1002.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAJ56TQJRTWSMTNPEA&Expires=1474584084&Signature=V4IoOeTuFjaauG2LReApxKtZg8%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DENERGY_ABSORPTION_OF_FOAM-FILLED_STEEL_E.pdf)
- [27] P.Paruka, M.Kamal Mohd Shah and Md A. Mannan, “Influence of axial and oblique impact loads on crush response properties of square tube structures made with FRP pultruded composites” in *The Malaysian International Tribology Conference 2013*, *Procedia Engineering*, vol.68, pp572-578,2013. [En línea]. Disponible en:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705813020778>

- [28] A.Jusuf, T.Dirgantara, L.Gunawan and I.Setya Putra, “ Crashworthiness analysis of multi-cell prismatic structures” in *International Journal of Impact Engineering*, vol. 78, pp. 4734-50, 2015.
- [29] X.Zhan and Hui Zhang, “ The crush resistance of four-panel angle elements” in *International of of Impact Engineering*, vol.78, pp 81-97, 2015.
- [30] J.Liu, S. Pattofatto, Fang, F.Lu and H.Zhao, “Impact strength enhancement of aluminium tetrahedral lattice truss core structures” in *International Journal of Mechanical Science*, vol.79, pp 3-13, 2015.
- [31] Thanapon Chotika, Jan-Welm Biermann and Saiprasit Koetnityom. “Energy Absorption Analysis of Various Vehicles under Crash Test Simulation.” en *The Second TSME International Conference on Mechanical Engineeringm*, 19-21 October, 2011, Krabi, Thailand. [En línea]. Disponible en:  
[http://rcme.engr.tu.ac.th/TSME-ICoME%20Web/full\\_paper\\_file/CST/CST09%20Chotika.pdf](http://rcme.engr.tu.ac.th/TSME-ICoME%20Web/full_paper_file/CST/CST09%20Chotika.pdf)
- [32] D. B. Schwinn, D. Kohlgrüber, J. Scherer, M. H. Siemann, “A parametrical transport aircraft fuselage model for preliminary sizing and beyond,” in *German Aerospace Congress*, 2014. [En línea]. Disponible en:  
<http://elib.dlr.de/94473/1/340104.pdf>
- [33] L. Xiaochuan , G. Jun , B. Chunyu b, S. Xiasheng and Mou Rangke,” Drop test and crash simulation of a civil airplane fuselage section” in *Chinese Journal of Aeronautics*, vol.28,pp447-456, 2015. [En línea]. Disponible en:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1000936115000230>
- [34] M. Pein, D. Krause, S. Heimbs and P. Middendorf, “Innovative energy-absorbing concept for aircraft cabin interior”. AST 2007, March 29-30, Hamburg, Germany. [En línea]. Disponible en:  
[http://www.heimbs-online.de/Heimbs\\_2007\\_Innovative\\_Energy-Absorbing\\_Concept.pdf](http://www.heimbs-online.de/Heimbs_2007_Innovative_Energy-Absorbing_Concept.pdf)

- [35] T.Yang and J.Wang “Crashworthy component design of an ultra-light helicopter with energy absorbing composite structure” in *3rd International Symposium on Aircraft Airworthiness, Procedia Engineering*, vol.80, pp 329-342,2014. [En línea]. Disponible en:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814011849>
- [36] J.F.Carney,”Motorway impact attenuation devices: past, present and future”, in *Structural Crashworthiness and Failure*. N.Jones, T.Wierzbicki (Eds), London: Taylor & Francis, 2010. 378-415 pp.
- [37] D.Tyrell, K.Severson-Green and B Marquis, “Evaluation of selected Crashworthiness Strategies for Passenger Trains” in *Journal of the Transportation Research Board*. [En línea]. Disponible en:  
[http://ntl.bts.gov/lib/52000/52600/52621/Tyrell\\_Eval\\_Selected\\_Crashworthiness.pdf](http://ntl.bts.gov/lib/52000/52600/52621/Tyrell_Eval_Selected_Crashworthiness.pdf)
- [38] D.Tyrell, K.Severson and B.Marquis, "Crashworthiness of Passenger Trains: Safety of high-speed Ground," U.S. Department of Transportation, DOT/FRA/ORD-97/10, 1998. [En línea]. Disponible en:  
<https://www.fra.dot.gov/eLib/Details/L03711>
- [39] Galea Crash Concept. Connect and Protect. Voith. [En línea]. Disponible en:  
[http://voith.com/de/1994\\_e\\_g1712en\\_internet.pdf](http://voith.com/de/1994_e_g1712en_internet.pdf)
- [40] *Aplicaciones ferroviarias. Requisitos de resistencia a la colisión para cajas de vehículos ferroviarios*, UNE-EN 15227:2008+A1:2011, AENOR (2011).
- [41] D. Tyrell, "Passenger Rail Train-to-Train Impact Test Volume I: Overview and Selected Results," U.S. Department of Transportation, DOT/FRA/ORD-03/17.I, July 2003.
- [42] F.J.González Fernández y J.Fuentes Llosa, *Ingeniería Ferroviaria: Segunda edición actualizada y ampliada*, 2ª ed. Uned (2010).674 pp.

- [43] Dr. G.Kotsikos, "Crashworthiness of rail vehicles," NewRail–Centre for Railway Research. Newcastle University. [En línea]. Disponible en:  
<http://www.ncl.ac.uk/newrail/assets/docs/Berlinseminar2010.pdf>
- [44] J. McGregor, D.J. Meadows, C.E. Scott and A.D. Seeds, "Impact performance of aluminium structures", in *Structural Crashworthiness and Failure*. N.Jones, T.Wierzbicki (Eds) , London : Taylor & Francis, 2010. 345-377pp.
- [45] A. Carnicero, "Introducción al método de los elemento finitos," Instituto de Investigación Tecnológica. ICAI. [ En línea]. Disponible en :  
[http://www.iit.comillas.edu/~carnicero/Resistencia/Introduccion\\_al\\_MEF.pdf](http://www.iit.comillas.edu/~carnicero/Resistencia/Introduccion_al_MEF.pdf)
- [46] S. Yadav and S. K. Pradhan, "Investigations into Dynamic Response of Automobile Components during Crash Simulation," in 12th Global Congress on Manufacturing and Management, Procedia Engineering, vol. 97, pp 1254 – 1264, 2014. [En línea]. Disponible en:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814034729>
- [47] "Introducción al método de los elementos finitos," Departamento de Ingeniería Mecánica, Apuntes Diseño Industrial, Universidad Carlos III de Madrid, 2015.
- [48] "Métodos numéricos en plasticidad," Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Universidad Carlos III de Madrid, 2015.
- [49] SIMULIA, "Abaqus 6.13 Documentation in *Abaqus Analysis User's Guide*. [En línea]. Disponible en:  
<http://129.97.46.200:2080/v6.13/>
- [50] J.L.Guillen, "El aluminio en el mundo actual: tecnología, aplicaciones y reciclado" Industria y minería, ISSN 1137-8042, N°. 366, 2006, pp. 26-38. [En línea]. Disponible en:  
[http://ingenierosdeminas.org/documentos/61204\\_aluminio.pdf](http://ingenierosdeminas.org/documentos/61204_aluminio.pdf)



- [51] M.Rodríguez Millán, “Análisis numérico del comportamiento frente a impacto del Aluminio 2024-T351 sometido a ensayo de Taylor”. Proyecto Fin de Carrera (2009). Universidad Carlos III de Madrid, Leganés. [En línea]. Disponible en:  
<http://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/8242>
- [52] R. Lesuer, G. J. Kay and M. M. LeBlanc,” Modeling Large-Strain, High-Rate Deformation in Metals,” July, 2001. [En línea]. Disponible en:  
<https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/243782.pdf>
- [53] G. Tiwari, M.A. Iqbal, P.K. Gupta and N.K. Gupta, “The ballistic resistance of thin aluminium plates with varying degrees of fixity along the circumference,” *International Journal of Impact Engineering*, vol.74, pp 46-56, 2014.